Environnement Canada Environment Canada

Canada

MENACES

pour la disponibilité de l'eau au Canada

104-04373/

Environnement Canada Environment Canada

Canada

MENACES POUR LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU AU CANADA

Rapport no 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, numéro 1

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SUR LES EAUX
SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE DU CANADA

Environnement Canada Service météorologique du Canada
Environment Canada Meteorological Service of Canada

NATIONAL WATER RESEARCH INSTITUTE
INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SUR LES EAUX

© Travaux publics et Services gouvernementaux Canada 2004

On peut obtenir des exemplaires additionnels à l'adresse suivante :

Direction de la liaison scientifique
Institut national de recherche scientifique
Environnement Canada
867, chemin Lakeshore, C.P. 5050
Burlington (Ont.) L7R 4A6

nwriscience.liaison@ec.gc.ca

Direction de l'évaluation scientifique et de l'intégration (DÉSI)
Service météorologique du Canada
Environnement Canada
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4

Pour consulter le rapport en format html ou pour le télécharger en format pdf, prière de se rendre au site Web de l'INRE : http://www.nwri.ca

Catalogage avant publication de la Bibliothèque nationale du Canada

Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada.

(Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE, ISSN 1499-5913 ; no 3)

(Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC ; no 1)

Publ. aussi en anglais sous le titre: Threats to water availability in Canada.

Comprend des réf. bibliogr.

ISBN 0-662-75617-7

No de cat. En40-237/3-2004F

1. Eau--Approvisionnement--Canada. 2. Eau--Approvisionnement--Aspect de l'environnement--Canada. 3. Eau--Qualité--Gestion--Canada. 4. Eau--Pollution--Canada. I. Institut national de recherche sur les eaux (Canada) II. Service météorologique du Canada. Direction générale des sciences atmosphériques et climatiques III. Collection. IV. Collection : Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC ; no 1.

TD226.T4714 2004 333.91'00971 C2004-900156-6

Référence correcte :

Environment Canada. 2004. Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Institut national de recherche scientifique, Burlington, Ontario. Rapport no 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, numéro 1. 148 p.

Photo de couverture : Tangle Falls, Banff (Alberta). Copyright : Corel Corporation.

Crédits photographiques : Le Comité directeur remercie les membres du personnel d'Environnement Canada qui ont autorisé l'utilisation de leurs photos. D'autres photos ont aussi été aimablement fournies par Keith Bridger (chapitre 1), Hydro-Québec (chapitre 2), T.J. Pultz (chapitre 4), D.W. Schindler (chapitre 8), Chris Hopkinson (chapitre 14) et Charles Priddle (chapitre 15).

Le rapport a été imprimé avec des encres végétales sur du papier sans acide et sans chlore élémentaire contenant 50 % de fibres recyclées dont 15 % après consommation.

TABLE DES MATIÈRES

APERÇU v

COMITÉ DIRECTEUR - ENVIRONNEMENT CANADA, ÉQUIPE DE PRODUCTION, RÉVISEURS, AUTEURS, ÉVALUATEURS EXTERNES vii

MENACES POUR LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU AU CANADA – *PERSPECTIVE* xiii

Chapitre 1

ATTRIBUTION, DÉRIVATION ET EXPORTATION DE L'EAU 1

Chapitre 2

BARRAGES, RÉSERVOIRS ET RÉGULATION DU DÉBIT DES EAUX 11

Chapitre 3

SÉCHERESSES 23

Chapitre 4

INONDATIONS 31

Chapitre 5

APPROVISIONNEMENT EN EAU DES MUNICIPALITÉS ET DÉVELOPPEMENT URBAIN 39

Chapitre 6

DEMANDES DE L'INDUSTRIE MANUFACTURIERE ET DES CENTRALES THERMIQUES 47

Chapitre 7

PRATIQUES ET CHANGEMENTS CONCERNANT L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE – AGRICULTURE 57

Chapitre 8

PRATIQUES ET CHANGEMENTS CONCERNANT L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE – FORESTERIE 67

Chapitre 9

PRATIQUES ET CHANGEMENTS CONCERNANT L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE – PRODUCTION MINIÈRE ET PÉTROLIÈRE 77

Chapitre 10

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – EAUX SOUTERRAINES 89

Chapitre 11

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – COURS D'EAU 97

Chapitre 12

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – LACS ET RÉSERVOIRS 105

Chapitre 13

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – MILIEUX HUMIDES 117

Chapitre 14

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – CRYOSPHÈRE 125

Chapitre 15

MENACES INTÉGRÉES ET CUMULATIVES POUR LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU 137

APERÇU

Pour les Canadiens, il est essentiel de pouvoir compter sur un approvisionnement sûr en eau non contaminée. À titre de porte-parole du gouvernement canadien en ce qui concerne les ressources en eau, Environnement Canada reconnaît l'importance d'une approche stratégique à la résolution des problèmes relatifs à l'eau qui préoccupent la population.

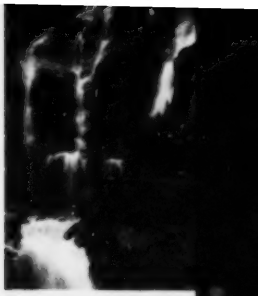
Or, l'inquiétude croissante que suscite au pays la question des réserves d'eau, y compris les inondations récentes – entre autres celles, dévastatrices, qui se sont produites au Saguenay et dans la région côtière en Colombie-Britannique – les sécheresses, le recul des glaciers et les effets des changements climatiques, a conduit à la préparation de ce rapport d'évaluation scientifique nationale, intitulé *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada*. La rédaction de ce document révisé par des pairs a été dirigée par des scientifiques de premier plan d'Environnement Canada qui travaillent à l'Institut national de recherche sur les eaux (INRE), le plus important établissement de recherche sur les eaux douces au pays, et au Service météorologique du Canada (SMC), le leader canadien en matière de prévisions météorologiques et de climatologie. (L'INRE a publié en 2002 un rapport présentant l'état des recherches scientifiques sur les principaux problèmes de qualité de l'eau au Canada, intitulé *Menaces pour les sources d'eau potable et les écosystèmes aquatiques au Canada* (http://www.nwri.ca/ threats/ intro-f.html), qui constitue un complément au présent rapport.)

Le rapport d'évaluation a été rédigé par des spécialiste d'universités, de l'industrie et de divers paliers du gouvernement, qui se sont réunis en ateliers pour élaborer les grandes lignes de leurs chapitres respectifs, auxquels ils ont ensuite mis la dernière main en petites équipes. Par la suite, tous les textes ont été soumis à l'examen par d'autres éminents spécialistes des disciplines traitées. Le rapport comprend 15 chapitres, qui abordent chacun des sujets liés à la disponibilité de l'eau, par exemple : barrages, réservoirs et régulation des débits d'eau, sécheresses, inondations, expansion domiciliaire et urbaine, demandes de l'industrie et du secteur manufacturier, mines, variabilité et changements climatiques, et impacts intégrés et cumulatifs. Comme dans le rapport sur la qualité de l'eau, chaque chapitre décrit en détail la situation et les tendances actuelles et indique les besoins en matière de connaissances et de programme à cet égard.

La section du document intitulée *Menaces pour l'approvisionnement en eau au Canada – Perspective*, rédigée par un spécialiste canadien réputé des sciences de l'eau, donne une idée de chaque menace ainsi que des enjeux majeurs et des principales constatations. Le lecteur est néanmoins invité à consulter le traitement plus détaillé des divers sujets traités dans le corps du document. Le spécialiste donne également son point de vue personnel sur les principales lacunes à combler en matière d'information et formule des recommandations à cet effet. Il définit

quatre grands champs d'action : observations et données nécessaires, priorités cruciales de la recherche, exigences en matière de politiques éclairées et de bonnes pratiques de gestion, et questions touchant le leadership.

Essentiellement, ce rapport d'évaluation se veut un document de référence important destiné aux décideurs, aux gestionnaires des ressources et aux chercheurs, qui pourront s'en servir pour établir les orientations et les priorités de la recherche au cours des prochaines années ainsi que pour élaborer des politiques et des pratiques de gestion judicieuses dans le domaine de l'eau. Le Comité directeur s'attend à ce que les questions et les besoins soulevés dans le document suscitent un débat animé entre les chercheurs, les parties intéressées et les gestionnaires et espère que ce débat mènera à l'élaboration opportune d'un plan d'action approprié.



Comité directeur - Environnement Canada

Jim Abraham (coprésident), Recherche en météorologie, Service météorologique du Canada

Fred J. Wrona (coprésident), Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

R. Scott McDonald (secrétariat), Politiques et affaires ministérielles, Service météorologique du Canada

Alex T. Bielak, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Leah Brannen, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Barry Goodison, Observations de la terre et des processus climatologiques, Service météorologique du Canada

John Lawrence, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Don McIver, Politiques, programmes et affaires internationales, Service météorologique du Canada

Linda D. Mortsch, Recherche en adaptation environnementale, Service météorologique du Canada

Des O'Neill, Donmec Consulting Inc.

Terry D. Prowse, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Équipe de production

Président : **Alex T. Bielak**, Direction de la liaison scientifique, Institut national de recherche sur les eaux

Gestion de la production et travail éditorial : **Kristin Alward**, Direction de la liaison scientifique, Institut national de recherche sur les eaux

Graphisme (conception graphique et mise en page) : **Grazyna Modzynski**, Direction de la liaison scientifique, Institut national de recherche sur les eaux

Graphisme : **Joanne Wotherspoon**, Direction du soutien à la recherche, Institut national de recherche sur les eaux

Mise en page Web : **Jacqui Young**, Direction du soutien à la recherche, Institut national de recherche sur les eaux

Réviseurs

Leah Brannen, Direction de la liaison scientifique, Institut national de recherche sur les eaux

Alex T. Bielak, Direction de la liaison scientifique, Institut national de recherche sur les eaux

Auteurs

* *Le Service de la conservation de l'environnement et le Service météorologique du Canada font partie d'Environnement Canada*

Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada – *Perspective*

Des O'Neill, DONMEC Consulting Inc.

1. Attribution, dérivation et exportation de l'eau

Frank Quinn, Direction générale de la coordination et des politiques relatives à l'eau, Service de la conservation de l'environnement*

J.C. (Chad) Day, École de gestion des ressources et de l'environnement, Université Simon Fraser

Michael Healey, Institut pour les ressources, l'environnement et la durabilité, Université de la Colombie-Britannique

Richard Kellow, Unité des eaux frontalières, Environnement Canada

David Rosenberg, Institut des eaux douces, Pêches et Océans Canada

J. Owen Saunders, Institut canadien du droit des ressources, Université de Calgary

2. Barrages, réservoirs et régulation du débit des eaux

Terry D. Prowse, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Fred J. Wrona, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Geoff Power, Département de biologie, Université de Waterloo

3. Sécheresses

Barrie Bonsal, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Grace Koshida, Recherche en adaptation environnementale, Service météorologique du Canada*

E.G. (Ted) O' Brien, Administration du rétablissement agricole des Prairies, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Elaine Wheaton, Conseil de recherche de la Saskatchewan

4. Inondations

Alain Pietroniro, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Robert Halliday, R. Halliday & Associates

Nicholas Kouwen, Département de génie civil, Université de Waterloo

Donald H. Burn, Département de génie civil, Université de Waterloo

Charles Lin, Département des sciences atmosphériques et océaniques, Université McGill

Sal Figliuzzi, Direction de l'hydrologie, Environnement Alberta

5. Approvisionnement en eau des municipalités et développement urbain

Jiri Marsalek, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

W. Edgar Watt, Département de génie civil, Université Queen's

Liz Lefrançois, Conservation des eaux et sensibilisation à ces ressources, Service de la conservation de l'environnement

Ben F. Boots, Buffalo Pound Water Administration Board

Stan Woods, Département des politiques et de la planification, District régional de Vancouver

6. Demandes de l'industrie manufacturière et des centrales thermiques

Karl Schaefer, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Donald Tate, GeoEconomics Associates Inc.

Steven Renzetti, Département d'économie, Université Brock

Chandra Madramootoo, Département de génie agricole et des biosystèmes, Université McGill

7. Pratiques et changements concernant l'aménagement du territoire - Agriculture

Brook Harker, Division des services analytiques, ARAP, Agriculture et Agroalimentaire Canada

John Lebedin, Unité des sciences de la terre, ARAP, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Michael J. Goss, Chaire de gérance du territoire, Université de Guelph

Chandra Madramootoo, Département de génie agricole et des biosystèmes, Université McGill

Denise Neilsen, Centre de recherches agroalimentaires du Pacifique, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Brent Paterson, Direction de l'irrigation, Agriculture, alimentation et développement rural de l'Alberta

Ted van der Gulik, Gestion des ressources, Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des pêches de la Colombie-Britannique

8. Pratiques et changements concernant l'aménagement du territoire - Foresterie

Markus N. Thormann, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada

Pierre Y. Bernier, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada

Neil W. Foster, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada

David W. Schindler, Département des sciences biologiques, Université de l'Alberta

Fred D. Beall, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada

9. Pratiques et changements concernant l'aménagement du territoire – Production minière et pétrolière

Carol Ptacek, institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

William Price, Laboratoires des mines et des sciences minérales, Ressources naturelles Canada

J. Leslie Smith, Chaire de géologie et d'environnement de la Cominco et du CRSNG, Université de Colombie-Britannique

Mark Logsdon, Geochimica Inc.

Rob McCandless, Prévention de la pollution et évaluation environnementales, Environnement Canada

10. Variabilité et changements climatiques – Eaux souterraines

Alfonso Rivera, Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada

Diana M. Allen, Département des sciences de la Terre, Université Simon Fraser

Harm Maathuis, Conseil de recherche de la Saskatchewan

11. Variabilité et changements climatiques - Cours d'eau

Paul H. Whitfield, Division des sciences, Service météorologique du Canada

Paul J. Pilon, Division des questions relatives aux eaux limitrophes, Service météorologique du Canada

Donald H. Burn, Département de génie civil, Université de Waterloo

Vivek Arora, Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique, Service météorologique du Canada

Harry F. Lins, Water Resources Division, United States Geological Service

Taha Ouarda, Institut national de la recherche scientifique – Eau

C. David Sellars, Experts-conseils en gestion des eaux

Christopher Spence, Division des sciences hydrologiques et atmosphériques, Service météorologique du Canada

12. Variabilité et changements climatiques - Lacs et réservoirs

William M. Schertzer, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Wayne R. Rouse, École de géographie et de géologie, Université McMaster

David C.L. Lam, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Derek Bonin, District régional de Vancouver

Linda D. Mortsch, Recherche en adaptation environnementale, Service météorologique du Canada

13. Variabilité et changements climatiques – Milieux humides

Garth van der Kamp, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Philip Marsh, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

14. Variabilité et changements climatiques - Cryosphère

Ross D. Brown, Division des processus climatiques et des observations terrestres, Service météorologique du Canada

Michael N. Demuth, Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada

Barry E. Goodison, Division des processus climatiques et des observations terrestres, Service météorologique du Canada

Philip Marsh, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Terry D. Prowse, Institut national de recherche sur les eaux, Service de la conservation de l'environnement

Sharon L. Smith, Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada

Ming-ko (Hok) Woo, Département de géographie, Université McMaster

15. Menaces intégrées et cumulatives pour la disponibilité de l'eau

Stewart J. Cohen, Recherche en adaptation environnementale, Service météorologique du Canada

Rob de Loë, Chaire de recherche du Canada en gestion de l'eau, Université de Guelph

Alan F. Hamlet, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington

Ross Herrington, Division des sciences hydrologiques et atmosphériques, Service météorologique du Canada

Linda D. Mortsch, Recherche en adaptation environnementale, Service météorologique du Canada

Dan Shrubsole, Département de géographie, Université de Western Ontario

Évaluateurs externes

Le comité directeur et les auteurs des chapitres désirent remercier tout spécialement, pour leur révision officielle qui a renforcé considérablement la présente évaluation des menaces qui s'exercent sur les ressources en eau du Canada, les personnes suivantes :

Kaz Adamowski, Département de génie civil, Université d'Ottawa

Tom Al, Département de géologie, Université du Nouveau-Brunswick

Robert Betcher, Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Manitoba

Dave Burke, Environnement Canada

James Buttle, Département de géographie, Université Trent

Sietan Chieng, Département de génie chimique et biologique, Université de Colombie-Britannique

Michael Church, Département de géographie, Université de Colombie-Britannique

Peter H. Gleick, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security

Kenneth Hall, Institut pour les ressources, l'environnement et la durabilité, Université de Colombie-Britannique

Robert Halliday, R. Halliday & Associates

Michael Healey, Institut pour les ressources, l'environnement et la durabilité, Université de Colombie-Britannique

Roberto Martinez-Espineira, Département d'économie, Université Saint-François-Xavier

Ed McCauley, Département des sciences biologiques, Université de Calgary

Scott Munro, Département de géographie (climatologie), Université de Toronto

André P. Plamondon, Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval

Jonathan S. Price, Département de géographie, Université de Waterloo

Peter Rasmussen, Département de génie civil, Université du Manitoba

David Rosenberg, Institut des eaux douces, Pêches et Océans Canada

Wayne Rouse, École de géographie et de géologie, Université McMaster

Dave Sauchyn, Département de géographie, Université de Régina

Martin Sharp, Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université de l'Alberta

Walter Skinner, Direction de la recherche climatologique, Service météorologique du Canada

David Swayne, Faculté des sciences environnementales, Université de Guelph

Donald Tate, GeoEconomics Associates Inc.

Mark Van Buren, Division du génie, Ville de Kingston

James Michael Waddington, École de géographie et de géologie, Université McMaster

Donald A. Wilhite, International Drought Information Center, University of Nebraska

MENACES POUR LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU AU CANADA – *PERSPECTIVE*

Des O'Neill

DONMEC Consulting Inc., Lower Sackville (N.-É.)

L'eau douce est une ressource limitée

Le Canada occupe 7% des terres émergées de la planète mais ne possède que 7% environ des réserves mondiales renouvelables d'eau douce.

L'eau douce est une ressource naturelle indispensable à la survie de tous les organismes vivants. Dans les sociétés modernes, l'eau est essentielle à un large éventail de secteurs et d'activités économiques. Cependant, l'eau douce est une ressource limitée. Le Canada est généralement perçu comme étant particulièrement privilégié en raison de l'abondance de ses ressources en eau douce; les citoyens et les industries du Canada sont parmi les plus grands consommateurs d'eau douce par habitant de la planète; mais cette abondance apparente est relative plutôt qu'absolue.

La population au Sud – Les réserves au Nord

Les Canadiens viennent au deuxième rang des consommateurs d'eau, après les Américains, utilisant environ 1 650 mètres cubes d'eau douce par habitant par année ... soit plus du double de la moyenne européenne.

La population du Canada est peu nombreuse en regard de l'immensité du territoire canadien et de l'abondance des ressources en eau; cette situation explique en grande partie la perception courante que nos réserves d'eau douce sont illimitées. Or, bon nombre de nos grands cours d'eau coulent vers le nord, loin des principaux centres démographiques; la concentration sans cesse croissante de la population dans les régions urbaines du Sud a entraîné un écart toujours plus grand entre les sources d'eau douce et les secteurs où la demande est forte. La présente évaluation des menaces qui pèsent sur nos réserves d'eau douce doit donc être consultée en gardant à l'esprit qu'il s'agit d'une ressource nationale limitée, pas toujours présente là où il le faudrait, et soumise à des pressions humaines et autres de plus en plus fortes.

L'eau – Plus précieuse que l'or?

La Ville de Caledon en Ontario (40 000 habitants) tire son eau potable de la nappe souterraine. Le coût de remplacement de son service d'adduction d'eau est estimé à 33 millions de dollars par année.

Il est indiscutable que les réserves d'eau douce du Canada représentent une ressource nationale très précieuse. Selon des estimations récentes, la contribution mesurable de l'eau à l'économie canadienne s'établirait entre 7,5 et 23 milliards de dollars par année, ce qui est comparable aux chiffres bruts de la production agricole et d'autres secteurs économiques importants. À l'échelle municipale et sectorielle, l'évaluation économique est un indicateur plus facile à comprendre et plus significatif, comme le montre le cas de la Ville de Caledon (Ontario).

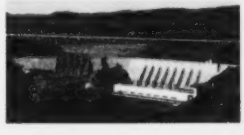
Les sources naturelles d'eau douce accessibles comprennent les cours d'eau, les lacs, les étangs et les réservoirs, les aquifères, le manteau neigeux, les glaciers, les champs de glace et, au niveau le plus élémentaire, les précipitations liquides et solides qui alimentent et renouvellent toutes les autres sources d'eau. Au Canada comme partout ailleurs, les sources d'eau sont soumises à des pressions considérables liées aux besoins domestiques croissants et à d'autres demandes souvent conflictuelles. Les besoins des municipalités, de l'agriculture et de l'industrie, par exemple, doivent de plus en plus être soupesés en regard de la nécessité de maintenir des débits adéquats dans les cours d'eau afin de soutenir d'importants écosystèmes aquatiques et populations de poissons. La variabilité du climat, les phénomènes météorologiques extrêmes et le spectre des changements climatiques menacent aussi les sources d'eau douce du Canada. Parallèlement, les Canadiens supposent d'entrée de jeu que les gouvernements vont protéger et préserver leurs sources d'eau douce face aux demandes de la population et aux changements naturels et anthropiques survenant dans les composantes importantes du système d'alimentation en eau.

Le présent rapport examine les menaces individuelles et collectives qui pèsent sur les réserves d'eau douce disponibles. À partir des discussions menées entre les participants à un atelier tenu à Victoria (Colombie-Britannique) en septembre 2002, ce rapport résume les connaissances, l'expertise et les contributions collectives d'une centaine de spécialistes des sciences de l'eau et de la gestion de l'eau issus du milieu universitaire, du secteur privé et du secteur public. Il présente une évaluation scientifique des répercussions individuelles et cumulatives de ces facteurs de stress et renferme des recommandations sur le rôle que peuvent jouer la science et les politiques dans l'atténuation de ces répercussions. Il attire l'attention sur la nécessité d'une mise en oeuvre plus systématique et continue des politiques et stratégies établies qui visent à protéger et à conserver les ressources en eau. De même, il souligne l'importance de renforcer et d'élargir les programmes de surveillance afin d'observer et d'évaluer les profils et les tendances relativement à la demande et à la consommation d'eau, ainsi que les paramètres applicables en matière d'environnement et d'écosystèmes. Enfin, ce rapport examine les effets cumulatifs des divers facteurs de stress et pressions exercés sur les ressources en eau douce du Canada et propose une approche visant à réagir à ces menaces d'une façon plus systématique et intégrée.

L'état actuel de nos connaissances scientifiques sur le cycle hydrologique occupe une place importante dans ce document, une attention particulière étant accordée aux impacts des activités anthropiques, de la variabilité et des changements climatiques. On y traite de l'impact des changements climatiques sur l'accès futur à nos ressources en eau douce dans maintes régions, ainsi que des modifications importantes des principales composantes du cycle hydrologique qui peuvent en résulter, notamment des variations de l'abondance des précipitations, de leur type ainsi que de leur répartition géographique et saisonnière, des profils d'évaporation et d'évapotranspiration, de la survenue et de la vitesse de la fonte des neiges. L'évaluation de la capacité actuelle et future des modèles climatologiques de prédire les conditions climatiques futures et les composantes connexes du cycle hydrologique constitue un volet important de la présente analyse. Un document d'accompagnement[1] déjà publié traite des menaces qui pèsent sur les sources d'eau potable et l'état des écosystèmes aquatiques au Canada. Les menaces décrites dans ce rapport sont inextricablement liées aux pressions exercées sur les réserves d'eau douce, et le lecteur doit garder à l'esprit qu'elles influent directement sur les réserves d'eau potable et l'état des écosystèmes.

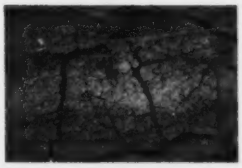
Débutant par un bref survol de l'historique de la gestion et de la consommation de l'eau au Canada, le **chapitre 1** du présent rapport porte sur un large éventail de sujets connexes sous la rubrique « Allocation, dérivation et exportation de l'eau ». Ces sujets touchent notamment la répartition internationale et interprovinciale de l'eau (c.-à-d. la division quantitative des débits entre différentes instances), l'ampleur, l'impact et les répercussions des dérivations entre bassins, l'intérêt relativement nouveau porté à la protection des valeurs d'intégrité du cours d'eau, le débat controversé sur les exportations d'eau et l'incidence potentielle des changements apportés aux droits des Autochtones.

Le **chapitre 2** traite des barrages, des réservoirs et des ouvrages de régulation du débit ainsi que des menaces qu'ils peuvent représenter pour la disponibilité globale de l'eau douce. On y décrit l'impact des barrages et d'autres types de rétention sur la qualité, la composition chimique et la structure thermique de l'eau, le régime des glaces fluviales, la charge et la déposition de sédiments ainsi que l'intégrité des écosystèmes aquatiques. Les nouveaux enjeux portent entre autres sur les inquiétudes entourant la sécurité et la désaffectation des barrages, et sur la nécessité de réévaluer ces aspects à la lumière des changements climatiques et de leurs impacts futurs sur les régimes hydrologiques. On attire également l'attention sur les perceptions contradictoires relatives aux barrages, qui sont vus à la fois comme des sources d'énergie hydroélectrique « propre » et d'importantes sources possibles de gaz à effet de serre.



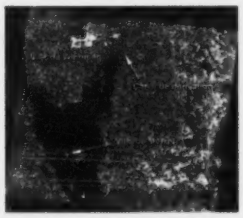
Les changements climatiques peuvent aggraver les pénuries d'eau

Par le passé, les sécheresses étaient très courantes dans le sud des Prairies, mais elles sont aujourd'hui au centre des préoccupations de scientifiques qui estiment que les changements climatiques peuvent augmenter la fréquence, la durée et la gravité de ces phénomènes dans toutes les régions du pays. Leurs causes et leurs impacts de même que leurs répercussions actuelles et futures sur la disponibilité de l'eau douce sont discutées au **chapitre 3**. On y décrit également la situation actuelle et les besoins futurs en matière de surveillance, de modélisation et de prévision des sécheresses, de même que les stratégies d'adaptation aux sécheresses.



Les changements climatiques vont perturber le régime des crues

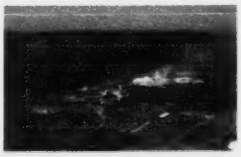
À l'autre extrémité du spectre hydrologique, les crues et les inondations perturbent considérablement les activités humaines et ont des effets aussi bien positifs que négatifs sur les systèmes naturels. Les crues exercent des pressions directes et indirectes sur la disponibilité de l'eau douce en endommageant les infrastructures, en contaminant les réserves d'eau et en modifiant le profil de réalimentation des nappes souterraines. Les crues printanières, alimentées par la fonte des neiges, sont une caractéristique notable de la plupart des cours d'eau du Canada. Le réchauffement climatique peut modifier grandement leur survenue et leur ampleur, en particulier dans les régions du sud du pays, et altérer directement les cycles saisonniers et annuels d'écoulement et la disponibilité de l'eau douce. Le **chapitre 4** examine ces enjeux et d'autres questions connexes, soulignant la nécessité de réévaluer les estimations de la crue maximale probable (CMP), de mettre à jour les cartes de délimitation des zones inondables et d'autres approches de planification, et d'appliquer ces outils de façon plus uniforme dans l'aménagement du territoire.



Les réserves d'eau des villes subissent déjà des stress

Les besoins des zones urbaines et résidentielles exercent une demande primaire sur les ressources en eau douce, parallèlement à une accélération de l'urbanisation au Canada. L'expansion des villes influe directement sur la disponibilité de l'eau pour d'autres secteurs en raison de ses impacts sur le stockage et le régime de ruissellement ainsi que sur la qualité de l'eau. De nos jours, les utilisations municipales représentent 11 % de la consommation totale d'eau douce au Canada, la moitié environ de ce pourcentage étant liée aux besoins résidentiels. Entre 1994 et 1999, environ 26 % des municipalités canadiennes ont signalé des pénuries d'eau dues à une consommation accrue, à la sécheresse ou à des problèmes d'infrastructure. Fait digne de mention, ce sont les municipalités qui puisent leur eau dans les nappes souterraines qui ont signalé le plus souvent des difficultés d'approvisionnement. Le **chapitre 5** examine les stress croissants exercés sur les réserves d'eau par le développement urbain et rural. On y souligne aussi diverses stratégies utilisées pour atténuer ces pressions, notamment la gestion de la demande et une plus grande sensibilisation à la réutilisation de l'eau et à l'emploi de sources d'eau de moindre qualité.

Les centrales thermiques et le secteur manufacturier se classent respectivement au premier et au deuxième rang des plus grands consommateurs d'eau au Canada; le **chapitre 6** traite de la très forte demande qu'exercent ces activités sur les réserves d'eau du pays. On y décrit aussi les facteurs régissant leurs besoins futurs en eau, les nouveaux enjeux et les besoins connexes en matière de politiques, de programmes et de recherches. Parmi les nouveaux enjeux relevés, on note les besoins considérables et croissants des industries de la nouvelle économie de la « technologie de pointe » en eau de très bonne qualité, peut-être puisée à même des sources municipales déjà fortement sollicitées.



Le secteur agricole consomme d'énormes quantités d'eau

Le secteur agricole vient au premier rang des plus grands consommateurs nets d'eau au Canada, utilisant quelque 70 % de l'eau puisée des cours d'eau, des ruisseaux, des réservoirs et des puits. Par conséquent, ce secteur vital exerce des pressions énormes sur les réserves d'eau disponibles, en particulier dans les provinces des Prairies, où se font 75 % de tous les prélèvements d'eau pour l'agriculture. Le **chapitre 7** examine les tendances relatives à l'utilisation de l'eau par le secteur agricole et les problèmes qui résultent de cette demande en eau. On y attire aussi l'attention sur le fait qu'environ 85 % de l'eau utilisée par le secteur agricole est destinée à l'irrigation[2] et que les changements climatiques devraient accroître encore cette demande. Dans ce chapitre, on indique aussi que des techniques améliorées, notamment l'établissement de calendriers d'irrigation et l'irrigation au goutte-à-goutte, peuvent permettre des économies d'eau substantielles; en outre, on pourrait utiliser des eaux usées urbaines pour irriguer certaines cultures.

Disparition des glaciers – réduction du débit des cours d'eau?

La taille des glaciers des montagnes Rocheuses, qui fournissent jusqu'à 10 % du débit de base utilisé pour l'irrigation dans l'Ouest canadien, peut diminuer considérablement d'ici un siècle!

L'eau de fonte des glaciers des montagnes Rocheuses alimente une grande partie du débit de base de nombreux cours d'eau dans l'Ouest canadien; par conséquent, les prévisions selon lesquelles ces glaciers disparaîtront d'ici un siècle soulèvent de vives inquiétudes du point de vue de la demande agricole et des autres types de demandes d'eau.

Les forêts sont importantes...

Le Canada possède environ 418 millions d'hectares de terres boisées, soit quelque 10 % des forêts de la planète, et le secteur forestier contribue grandement à l'économie nationale. Les forêts jouent un rôle déterminant dans le cycle hydrologique et influent sur le régime d'évapotranspiration, le ruissellement et l'humidité du sol. Cependant, les perturbations causées par les opérations forestières et les incendies de forêt ont un impact majeur sur le débit des cours d'eau, la qualité de l'eau, le transport de sédiments et la réalimentation des eaux souterraines. Au **chapitre 8**, on examine l'état des forêts et les pratiques forestières en regard de leur contribution aux ressources en eau du pays, et des menaces qu'ils représentent pour ces mêmes ressources. On traite également des impacts des incendies de forêt, des infestations d'insectes et de certaines pratiques comme la coupe à blanc sur le cycle hydrologique. En outre, on fait ressortir le rôle majeur des forêts dans le cycle planétaire du carbone.

Lequel vaut plus cher : le pétrole ou l'eau?

L'industrie pétrolière et gazière de l'Alberta détient des droits sur 25 % des réserves d'eau souterraine de la province aux fins de la récupération du pétrole dans les puits.

Les industries minière et pétrolière du Canada sont parmi les plus grands extracteurs de ressources du monde. La demande en eau de l'industrie minière est limitée et localisée, mais elle augmente lorsque les opérations de fonte et d'affinage et la fabrication sont prises en compte. De plus, le rejet par les mines abandonnées d'une eau qui ne satisfait pas aux normes environnementales fait peser une grande menace sur les réserves d'eau douce disponibles dans certaines régions du pays. Le secteur pétrolier, quant à lui, a besoin de quantités de plus en plus grandes d'eau douce. Parmi les applications qui consomment beaucoup d'eau, mentionnons l'extraction de pétrole des sables bitumineux et l'injection d'eau dans des formations profondes pour accroître la production d'hydrocarbures pétroliers. Les eaux usées rejetées en grandes quantités au cours de l'extraction du pétrole des sables bitumineux sont de piètre qualité et doivent être stockées dans des réservoirs pendant de longues périodes, tandis que l'injection d'eau entraîne une perte permanente d'eau qui servirait à d'autres fins. Le **chapitre 9** examine l'utilisation de l'eau par l'industrie minière et pétrolière, l'impact des sécheresses, des crues et des changements climatiques sur leurs opérations, et les défis que doit relever l'industrie pour répondre à la demande croissante de ressources dans un contexte de réglementation plus stricte en matière d'environnement et compte tenu des fluctuations climatiques et les phénomènes extrêmes qui se produisent.

Les eaux souterraines sont une ressource cachée et peu sûre

Environ 30 % des Canadiens tirent leur eau potable des eaux souterraines ... les pénuries d'eau des municipalités sont plus fréquemment signalées par les collectivités qui s'approvisionnent à même les nappes souterraines.

Comme on le notait précédemment, les eaux souterraines représentent une composante vitale des ressources en eau douce du Canada, répondant à une grande proportion des besoins en eau des municipalités, de l'agriculture et d'autres secteurs. Le **chapitre 10** révèle que nos connaissances sur le régime des eaux souterraines est beaucoup plus limité que sur les plans d'eau de surface[3]; en outre, la gestion des eaux souterraines incombe souvent à des organismes autres que ceux qui gèrent les autres composantes des ressources en eau. Ainsi, on relève des lacunes au chapitre des connaissances et des enjeux institutionnels, qui doivent être abordées au moment de l'élaboration de politiques et de stratégies de gestion des eaux souterraines.

Dans le **chapitre 11**, on examine les impacts potentiels de la variabilité et des changements climatiques sur la disponibilité de l'eau dans les cours d'eau. On fait ressortir l'importance cruciale de la surveillance systématique et à long terme des paramètres hydrométéorologiques dans les bassins hydrographiques représentatifs, qu'ils soient grands ou petits, dans toutes les régions du pays. En conclusion, on insiste sur la nécessité d'accorder une plus grande priorité aux sérieuses répercussions que peuvent avoir les changements climatiques sur la disponibilité de l'eau dans nos cours d'eau, d'intensifier nos efforts pour les atténuer, de faire preuve de leadership et d'allouer un plus grand nombre de ressources à cet effet.

Le Canada – pays de lacs

Environ 14 % des lacs de la planète qui ont une superficie de plus de 500 km^2 sont situés au Canada.

Le Canada compte plus d'un million de lacs qui occupent environ 7,6 % du territoire et plus de 900 grands réservoirs. Les lacs et réservoirs sont des sources d'eau douce d'une importance vitale pour les municipalités, l'agriculture, l'industrie, les loisirs et d'autres activités, et ils constituent en soi des écosystèmes importants. Le **chapitre 12** porte sur les impacts des changements climatiques et de la consommation accrue de l'eau des lacs et des réservoirs par les humains. Les auteurs mentionnent et commentent les réactions probables de ces plans d'eau à la variabilité et aux changements climatiques, soulignant qu'il y a des différences de vulnérabilité entre les divers lacs. Ils révèlent que les scénarios climatiques calculés grâce à la génération actuelle de modèles climatiques ont de quoi nous inquiéter, faisant craindre un abaissement du niveau d'eau des lacs et des réservoirs dans un avenir prévisible. Ces réductions pourraient résulter de changements dans la survenue et la vitesse de la fonte des neiges et des glaciers, de variations dans les régimes de précipitations et de l'augmentation des taux d'évaporation associée au réchauffement climatique.

Les tourbières du Canada : des bombes à retardement?!

Les tourbières du Canada renferment quelque 150 milliards de tonnes de carbone ... soit environ 25 fois la quantité de carbone libérée par les combustibles fossiles dans l'atmosphère chaque année à l'échelle de la planète.

Peu connus du public en général, les milieux humides sont des composantes essentielles du régime hydrologique : ils modulent le régime d'écoulement des cours d'eau, réalimentent les aquifères et agissent comme réservoirs dans le cycle de production, de rejet et de stockage des principaux gaz à effet de serre. En plus d'être des écosystèmes importants, les milieux humides absorbent, emmagasinent et assimilent les contaminants et fournissent des possibilités d'activités récréatives. Les milieux humides du Canada couvrent environ 1 300 000 km^2, ce qui est légèrement supérieur à la superficie de l'Ontario. Les tourbières, que l'on trouve surtout dans les régions boréales et subarctiques, sont de loin les milieux humides les plus courants, constituant 85 % de la superficie totale des milieux humides. Comme on le verra au **chapitre 13**, la stabilité future des milieux humides en général, et des tourbières en particulier, est incertaine compte tenu du réchauffement climatique[4]. Ce facteur brandit le spectre du rejet massif de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Quelques arpents de neige (en voie de disparition?)!

La totalité du territoire du Canada subit un gel saisonnier du sol, et dans la moitié du Canada, le sol est gelé en permanence (pergélisol).

Décrit par Voltaire comme étant « quelques arpents de neige », le Canada projette sur la scène mondiale une image de pays de neige et de glace pendant une bonne partie de l'année. De fait, la cryosphère – neige, glace, glaciers, pergélisol et sol gelé – est l'une des composantes les plus importantes de notre milieu physique et biologique. Les auteurs du **chapitre 14** soulignent que les systèmes hydrologiques de la plupart des bassins fluviaux du Canada comportent des changements de phase et des réserves saisonnières auxquelles participent la cryosphère et les processus cryosphériques. La fonte des glaciers de la Cordillère, comme on l'indiquait précédemment, apporte une contribution importante au débit des différents cours d'eau en été. La couverture de glace a une influence déterminante sur les débits des cours d'eau et des lacs ainsi que sur les écosystèmes, et elle influe sur l'écoulement, les cycles d'évaporation et le climat local. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a prédit que le réchauffement climatique planétaire se ferait davantage sentir dans les régions arctiques et subarctiques. On peut s'attendre à ce que la cryosphère réagissent au réchauffement du climat par une diminution des précipitations solides, un raccourcissement de la durée de la couverture de neige et de glace, une disparition graduelle des glaciers alpins, un accroissement de la profondeur de la couche active du pergélisol, et la fonte de la glace de sol. De toute évidence, ces changements auront de profondes répercussions sur le Canada et les autres pays septentrionaux. Mais il ne sera pas facile de quantifier ces réactions et leurs conséquences, car les modèles climatiques actuels ont une capacité limitée de simuler les caractéristiques clés des climats des régions froides.

Menaces cumulatives et intégrées pour la disponibilité de l'eau douce : une réalité d'aujourd'hui!

Les auteurs du **chapitre 15** examinent les problèmes épineux mais bien réels que représentent les menaces cumulatives et intégrées[5] à la disponibilité de l'eau douce, et la nécessité de gérer ces pressions croissantes et difficilement contrôlables. Ils utilisent le cas du bassin de Columbia pour illustrer la façon dont des décisions indépendantes prises antérieurement par des organismes gouvernementaux au mandat limité ont contribué à créer ce que l'on appelle communément un « méta-problème », dont les impacts vont bien au-delà du champ de compétence d'un seul organisme ou ordre de gouvernement. Compte tenu des relations complexes que présentent les menaces cumulatives et intégrées, ils insistent sur la nécessité d'élaborer des stratégies de gestion de l'eau ciblées de façon plus large, intégrées et basées sur la consultation. Les auteurs discutent des mécanismes mis au point présentement pour régler ces méta-problèmes dans les provinces des Prairies et le bassin des Grands Lacs (p. ex., Régie des eaux des provinces des Prairies, plan albertain de gestion de l'eau du bassin de la rivière Saskatchewan Sud, Charte des Grands Lacs).

AGIR, OUI MAIS COMMENT?

Chacun des chapitres du présent document attire l'attention sur une multitude de facteurs de stress ou de menaces sectoriels et généraux touchant les ressources en eau douce du pays et indique les lacunes à combler dans nos connaissances et notre compréhension scientifiques actuelles. Ces chapitres correspondent à des évaluations scientifiques de fond effectuées par des experts sur chaque sujet abordé. Du point de vue actuel de l'auteur, ces évaluations scientifiques font ressortir la nécessité de mesures urgentes et soutenues sur un certain nombre de fronts afin d'assurer aux Canadiens l'accès à des réserves d'eau douce adéquates dans l'avenir. Ainsi, les sections suivantes représentent la synthèse par l'auteur des principales conclusions et recommandations tirées du rapport, et certaines réflexions concernant leurs implications pour l'élaboration de politiques et la prise de décisions à venir. En bref, ces sujets peuvent être regroupés sous quatre rubriques.

- **Besoins en matière d'observation et de données**
- **Priorités de recherche vitales**
- **Besoins en matière de politiques éclairées et de gestion efficace**
- **Le défi du leadership**

Besoins en matière d'observation et de données

Pour savoir quoi faire ... on doit d'abord savoir ce qui se passe ...

L'acquisition systématique de données d'observation sur les ressources en eau douce du Canada représente un engagement à long terme et coûteux. Mais des programmes de surveillance bien conçus et dotés de ressources suffisantes sont absolument essentiels pour documenter les tendances en matière d'approvisionnement et de consommation d'eau douce, pour appuyer la recherche et pour mesurer et évaluer les impacts des politiques et des pratiques administratives et opérationnelles relatives à l'eau.

À la base, le rapport indique les manques importants observés dans nos connaissances sur les ressources en eau douce du Canada, les habitudes de consommation de l'eau et les infrastructures relatives à l'eau, faisant ressortir entre autres les points cidessous.

- Nos réseaux de surveillance des eaux de surface, des eaux souterraines, des précipitations, de la cryosphère et d'autres composants ne disposent pas de ressources adéquates et d'une coordination efficace. Les données d'observation de l'écoulement en temps réel (ou presque) sont insuffisantes pour étayer les applications des modèles hydrologiques; le territoire couvert par les observations[6] présente des « trous » importants sur le plan régional et au niveau des thèmes; il n'y a pas de réseau national de surveillance des eaux souterraines ou des milieux humides; et l'accès aux données historiques, y compris les données sur le paléoclimat et les crues anciennes, doit être amélioré.
- Des inventaires fiables des lacs et des réservoirs, des ressources liées aux aquifères, des glaciers, de l'état et de la capacité des systèmes de traitement et de distribution de l'eau, et d'autres éléments importants comme le nombre, la taille et l'emplacement des chantiers miniers et des dépôts de stériles.
- Les profils de la demande et de l'utilisation de l'eau doivent faire l'objet d'un suivi systématique, avec un niveau de détail suffisant sur le plan temporel et spatial, afin de documenter les utilisations, tendances et variations/pertes sectorielles, les effets des conditions météorologiques et des saisons. On a également besoin de données plus complètes sur les prélèvements d'eau souterraine, la qualité des effluents et le comportement de l'écosystème dans les eaux réceptrices.

En somme, les auteurs soulignent des déficiences importantes dans la conception, l'exploitation et la coordination des réseaux de surveillance des eaux de surface, des eaux souterraines et du climat; dans la documentation relative à la demande d'eau, aux habitudes de consommation de l'eau, à la qualité des effluents et aux impacts sur l'écosystème, ainsi que dans les inventaires de base des ressources en eau. Il n'y a donc pas de quoi se surprendre s'ils recommandent une expansion ciblée intelligemment de la surveillance de base pour les composantes clés du cycle hydrologique, les paramètres représentatifs de la demande et de l'utilisation de l'eau, la qualité des effluents et les impacts sur les milieux aquatiques. À la lumière de cette recommandation, il semble urgent d'entreprendre un examen national coordonné des programmes de surveillance des eaux douces afin de repérer ces lacunes particulières et d'élaborer des propositions, par ordre de priorité, en vue de mesures correctrices. Bien que l'on ait réussi récemment à rationaliser les réseaux climatiques et hydrométriques[7], il est clair que l'on doit continuer de promouvoir l'intégration et la complémentarité entre les divers programmes de surveillance sectoriels. De plus, les progrès réalisés dans les techniques de surveillance, comme la télédétection par satellite, devraient être mis en application de manière plus intensive et systématique. Une initiative importante pourrait consister à mettre au point des indicateurs et à diffuser régulièrement des données à ce sujet, sur l'état des ressources en eau douce[8] et leur importance socio-économique afin d'accroître et d'appuyer la sensibilisation du public aux enjeux relatifs à l'eau.

Priorités de recherche vitales

La recherche scientifique renforce notre capacité collective de mieux comprendre les enjeux, de faire des évaluations éclairées et de prendre des décisions rationnelles.

Il est largement reconnu que la recherche doit générer de nouvelles connaissances, faire évoluer la technologie, prédire la disponibilité future des ressources et le profil de la demande, examiner les incertitudes et évaluer les risques et les avantages découlant des politiques et des stratégies. Une base de connaissances enrichie est nettement essentielle pour prédire les menaces qui pèseront sur les ressources en eau douce disponibles et pour élaborer des politiques et pratiques plus efficaces pour la gestion de l'eau. Dans le contexte actuel, les incidences de la variabilité et des changements climatiques sur les ressources en eau et sur les profils de la demande et de l'utilisation de l'eau soulèvent des préoccupations majeures. Préciser ces incidences devrait représenter une priorité absolue en recherche. Pour relever ce défi, il faut améliorer les simulations du climat futur et rendre les prévisions climatiques saisonnières plus utiles. Plus particulièrement, les auteurs font les recommandation cidessous.

- On devrait rehausser la résolution des modèles de circulation générale (MCG), améliorer la représentation de la cryosphère et prendre d'autres mesures appropriées pour renforcer leur capacité de simuler les divers aspects d'importance hydrologique; en bref, il faut assurer un soutien continu à la capacité du Canada en matière de modélisation, qui est de calibre mondial.

- Les causes physiques des sécheresses survenues par le passé doivent être clairement définies, et la surveillance et la modélisation des conditions liées à la sécheresse doivent être améliorées; on devrait utiliser davantage les capacités de prédiction en environnement afin de sonner l'alerte dès l'apparition des conditions de sécheresse, et chercher de meilleures stratégies d'adaptation à la sécheresse.

- Les incidences de la variabilité et des changements climatiques sur les écosystèmes d'eau douce, l'hydrologie forestière, la distribution du pergélisol et la fonte de la glace de sol, les tourbières, les milieux humides et les glaciers doivent être clarifiées. Un autre défi particulièrement important consistera à intégrer le changement climatique à l'analyse de la fréquence des crues et à la cartographie des zones inondables.

D'un point de vue plus général, les auteurs recommandent que des efforts de recherche visent à améliorer la compréhension et la modélisation des processus et des systèmes hydrologiques, y compris des aspects tels que les effets des changements d'aménagement du territoire sur les crues; les liens entre la gestion des terres, le bilan hydrique du sol et la distribution des précipitations; et le lessivage des résidus miniers dans les sols gelés. On devrait mettre l'accent davantage sur la synthèse et l'intégration des résultats de recherche en utilisant des modèles qui intègrent les cycles hydrologiques et biogéochimiques; la connaissance des mécanismes

hydrologiques doit être progressivement intégrée aux modèles de bassins hydrographiques, et des modèles récents doivent être appliqués à la prédiction des crues, s'appuyant sur de meilleures compétences dans la prévision des pluies très abondantes. Comme activité de soutien, on devrait poursuivre la recherche de meilleurs algorithmes de télédétection et approches pour effectuer des test statistiques et des études diagnostiques.

On doit également se pencher sur les problèmes de qualité de l'eau, par exemple, les nouveaux produits chimiques préoccupants et leurs effets sur la santé humaine et les écosystèmes, la chimie des eaux de lixiviation des résidus miniers, et les procédés améliorés pour le traitement, l'épuration et le recyclage de l'eau. De même, on devrait améliorer la compréhension des facteurs sociaux et économiques qui sous-tendent la demande d'eau ou font obstacle à l'innovation, à la conservation et au recyclage, et des modèles socio-économiques mis au point pour diverses utilisations de l'eau et les facteurs qui régissent les profils de la demande et les décisions en matière de recirculation.

Besoins en matière de politiques éclairées et de gestion efficace

Les connaissances scientifiques servent de point de départ à l'élaboration de politiques et de pratiques avant-gardistes.

La mise en oeuvre de politiques avant-gardistes et de pratiques de gestion efficaces basées sur des connaissances scientifiques, conjuguée au soutien d'un public bien informé, sera essentielle si l'on veut trouver des solutions efficaces aux nombreux problèmes et défis mentionnés dans le présent rapport. Au cours des prochaines décennies, on devra faire preuve de beaucoup de prudence dans la répartition des droits d'utilisation des eaux transfrontalières compte tenu des risques croissants de conflits entre les diverses instances juridictionnelles. Il faut tenter d'optimiser les cadres institutionnels afin de faciliter la gestion intégrée des terres et de l'eau, en tentant de parvenir à un équilibre logique entre les diverses utilisations concurrentes, en réduisant au minimum les menaces à long terme pour l'eau douce, et en assurant une attribution équitable de l'eau dans les bassins et entre les diverses instances. On devrait raffiner les approches financières pour éviter tout retard dans le remplacement d'infrastructures d'eau vétustes. On pourrait renforcer la coordination et la coopération entre les divers organismes fédéraux, provinciaux, territoriaux et municipaux et avec des organisations du secteur privé dans la planification, l'instauration et l'administration de programmes de surveillance, en plus de consolider les liens entre les scientifiques et les gestionnaires dans le domaine de l'eau pour faciliter l'application des nouvelles connaissances et techniques. En outre, selon le concept du développement durable, on doit tenir compte des besoins intergénérationnels en ce qui a trait à l'eau douce.

Les évaluations scientifiques fournissent un lien utile entre les chercheurs et les besoins des décideurs.

Par conséquent, on doit accroître la compréhension et le soutien du public grâce à des campagnes d'information qui insistent sur l'importance socio-économique fondamentale de l'eau douce, les limites des réserves d'eau douce et la nécessité de conserver et de protéger cette ressource, mettant en évidence les mesures concrètes que les particuliers et les collectivités peuvent prendre pour y arriver.

Le défi du leadership

Le leadership scientifique et le travail d'équipe sont nécessaires si l'on veut écarter les nombreuses menaces qui pèsent sur l'accès des Canadiens à l'eau douce dans l'avenir.

À l'échelle la plus fondamentale, le présent rapport confirme la nécessité d'un leadership vigoureux et d'un meilleur esprit d'équipe entre diverses instances juridictionnelles et disciplines afin de trouver des solutions aux problèmes criants liés à l'accès futur des Canadiens aux réserves d'eau douce. Il va de soi qu'un leadership scientifique est nécessaire pour définir plus précisément les besoins, établir un ordre de priorité et obtenir un financement en vue d'implanter les améliorations dont on a grand besoin dans les programmes de surveillance afin que les Canadiens connaissent avec certitude le volume et l'état de nos réserves d'eau douce, leur importance socio-économique, la gravité des menaces qui planent sur cette ressource, et les effets des politiques, des pratiques de gestion et des influences extérieures. Le Canada doit aussi faire montre d'un leadership scientifique et de vision s'il veut cibler les efforts de recherche sur des problèmes qui sont vraiment critiques afin d'assurer l'approvisionnement futur en eau douce aux Canadiens. Il faut également un leadership engagé et un travail d'équipe à long terme aux plus hauts niveaux de décision gouvernementaux pour parvenir à un plus grande cohérence dans les politiques et les pratiques à l'intérieur des champs de compétence et d'une instance à l'autre.

CONCLUSION

En conclusion, le présent rapport expose le défi d'élaborer et de mettre en application des politiques et des mesures visant à garantir la durabilité de l'approvisionnement en eau douce au Canada compte tenu des diverses menaces et pressions décrites dans ces chapitres. Un engagement politique et institutionnel à long terme sera essentiel si l'on veut relever efficacement ce défi. En conséquence, la valeur fondamentale de ce rapport dépendra en grande partie de la mesure dans laquelle il attirera l'attention et stimulera l'action chez les décideurs et les institutions. En bout de ligne, les auteurs auront atteint leur but si leurs efforts peuvent contribuer à garantir aux Canadiens un accès à long terme et à prix abordable aux ressources en eau douce nécessaires à la consommation humaine, au développement social et économique durable ainsi qu'à la protection et à la conservation des valeurs esthétiques, environnementales et autres.

---

[1]Environnement Canada. 2001. Menaces pour les sources d'eau potable et les écosystèmes aquatiques au Canada. Institut national de recherche sur les eaux, Burlington (Ontario). Rapport no 1, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE. 100 p.

[2]La proportion restante, soit 15 %, étant utilisée pour abreuver le bétail.

[3]Le Canada ne dispose pas d'un réseau national de surveillance des eaux souterraines.

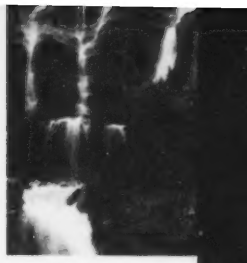
[4]La dégradation du pergélisol modifie déjà sensiblement les tourbières du Canada à mesure que la limite méridionale de la zone de pergélisol discontinu remonte vers le Nord.

[5]Les menaces intégrées résultent d'une combinaison de facteurs de stress. Les menaces et les impacts cumulatifs augmentent progressivement et se font sentir au fil du temps.

[6]Plus particulièrement pour la cryosphère, dans les bassins non régulés et dans le Nord.

[7]Ces efforts ont débouché sur la création du Réseau hydrométrique de référence et du Réseau national de référence sur le climat.

[8]On ne saurait trop insister sur l'importance d'instantanés faciles à comprendre et percutants montrant les conditions observées, car l'importance d'investissements continus dans des programmes de surveillance à long terme est mal comprise par le public en général et par les décideurs.



Chapitre 1

ATTRIBUTION, DÉRIVATION ET EXPORTATION DE L'EAU

Frank Quinn[1], J .C. (Chad) Day[2], Michael Healey[3], Richard Kellow[4], David Rosenberg[5] et J. Owen Saunders[6]

[1] Environnement Canada, Politiques de l'eau, Ottawa (Ont.)

[2] Université Simon Fraser, Aménagement des ressources naturelles, Vancouver (C.-B.)

[3] Université de la Colombie-Britannique, Institut pour les ressources, l'environnement et la durabilité, Vancouver (C.-B.)

[4] Environnement Canada, Unité des eaux transfrontalières, Regina (Sask.)

[5] Pêche et Océans Canada, Institut des eaux douces, Winnipeg (Man.)

[6] Université de Calgary, Institut canadien du droit des ressources, Calgary (Alb.)

Situation actuelle et tendances

La disponibilité limitée de l'eau douce au Canada, à divers endroits et à diverses périodes de l'année, soulève des conflits entre les utilisateurs de cette ressource. Le présent chapitre explore certains des problèmes rencontrés. L'attribution des ressources en eau par les gouvernements a une incidence sur l'endroit où cette eau est utilisée, sur le moment où elle est disponible et sur la quantité qui peut être utilisée. On peut atténuer les pénuries dans une certaine mesure en révisant le système d'attribution. La disponibilité de l'eau peut être allongée au moyen de structures : barrages – qui retiennent l'eau que l'on pourra laisser s'écouler *quand* la demande augmentera (ou que le débit risquera moins de causer des dommages) – et ouvrages de dérivation entre bassins, qui redirigent l'eau là où la demande est la plus forte. De temps en temps, la demande vient de l'extérieur du pays.

Attribution

Dès l'arrivée des premiers colons dans la plupart des provinces de l'Est, l'utilisation et l'attribution de l'eau ont été régies en fonction des *droits des riverains*, principe emprunté à la Common Law. Seuls ceux qui possédaient une propriété adjacente à un lac ou à un cours d'eau pouvaient utiliser l'eau, que ce soit à des fins domestiques ou pour d'autres usages, tant et aussi longtemps qu'ils ne brimaient pas les droits des autres riverains. Dans les provinces de l'Ouest, cependant, les lois et les institutions ont évolué différemment, principalement en raison de la rareté de l'eau et d'un besoin concomitant, constaté dès le début de l'expansion de l'agriculture, à savoir transporter l'eau au-delà des zones riveraines privées. Deux nouvelles notions ont alors été introduites, d'après l'expérience de l'Australie et des États-Unis : l'*appropriation antérieure*, c'est-à-dire l'autorisation donnée par le gouvernement d'utiliser l'eau selon la règle du premier arrivé, premier servi dans chaque territoire de l'Ouest; la *répartition*, soit le partage négocié du débit de cours d'eau transfrontaliers entre des territoires.

En 1859, on a introduit le principe de l'appropriation antérieure en Colombie-Britannique pour résoudre les conflits entourant l'exploitation des mines par la méthode hydraulique. En 1894, des fonctionnaires fédéraux l'ont introduit dans la région des Prairies (*Acte d'irrigation du Nord-Ouest*) afin d'assurer l'accès à l'eau pour l'irrigation. Chacune des provinces des Prairies a inclus les dispositions essentielles de cette loi dans sa propre législation lorsque le gouvernement fédéral a cédé les pouvoirs à celles-ci sur les ressources naturelles en 1930 (Percy, 1988).

Le modèle fondamental de l'Ouest reconnaît la priorité des droits antérieurs sur les nouvelles utilisations de l'eau, même si celles-ci sont plus avantageuses. Les gouvernements peuvent réserver de l'eau non attribuée dans l'intérêt du public, mais ce pouvoir n'a été exercé la plupart du temps que pour conférer des droits sur l'eau aux responsables de grands projets d'irrigation et d'aménagement hydroélectrique.

Les lacunes intrinsèques du principe d'appropriation sont devenues évidentes au fil du temps. Ce principe favorise les premiers utilisateurs, les agriculteurs par exemple, qui consomment d'importants volumes d'eau, laissant peu ou pas de possibilités aux utilisations ultérieures, particulièrement celles des milieux urbains et celles sur place. Qui plus est, ce principe empêche le transfert des droits d'utilisation de l'eau pour d'autres utilisations ou à d'autres utilisateurs qui pourraient vouloir exercer leur droit à un autre endroit. En outre, les actuels détenteurs de droits ne sont visés par aucune

mesure les incitant à conserver de l'eau dont pourrait bénéficier d'autres utilisateurs. Certains cours d'eau sont même grevés de droits qui excèdent le débit disponible. Inévitablement, ce système a provoqué des pénuries d'eau à l'échelle régionale, et on a dû faire des études techniques pour importer de l'eau provenant de sources non attribuées et éloignées (Saskatchewan-Nelson Basin Board, 1972). Le problème est devenu particulièrement important dans le sud de l'Alberta, où le manque d'eau est courant et où la concurrence augmente. Heureusement, des réformes sont amorcées. Les amendements de la *Water Act* de l'Alberta, qui sont entrés en vigueur en 1999, comportent des dispositions pour la commercialisation volontaire de droits sur l'eau dans les bassins hydrographiques, sujets à une retenue pouvant atteindre 10 % du transfert pour couvrir les utilisations sur place (Alberta Environment, 2003).

Comme le principe de l'appropriation, le principe de la division ou de la répartition quantitatives des débits d'eau entre les territoires qui partagent un bassin hydrographique est propre à l'environnement aride de l'Ouest. Contrairement au principe de l'appropriation, cependant, la répartition des ressources hydriques ne semble pas mettre en péril la disponibilité de l'eau. Au contraire, les accords de répartition assurent à chacun des gouvernements participants une part de l'approvisionnement en eau, laquelle peut servir de fondement à leurs programmes de développement à long terme.

Les provinces des Prairies sont signataires d'accords de répartition officiels de cours d'eau internationaux et interprovinciaux (tableau 1). Essentiellement, les accords prescrivent une division égale ou quasi égale de l'eau entre les territoires situés en amont et en aval. Ce régime a vu le jour dès le début du 20e siècle avec la division des débits des rivières St. Mary et Milk de part et d'autre de la frontière internationale et s'est implanté plus profondément après de longues négociations concernant les eaux interprovinciales s'écoulant vers l'Est, lesquelles se sont amorcées après le milieu du siècle. On semble intéressé à étendre l'application de tels accords de répartition à d'autres cours d'eau des Prairies qui traversent le quarante-neuvième parallèle, notamment la rivière Poplar et éventuellement la rivière Rouge ou son tributaire, la Pembina.

Tableau 1. Répartition transferontalière du débit*

a) Canada - États-Unis

Bassin	Gouvernements riverains	Autorisation	Formule
Rivières St. Mary et Milk, y compris les tributaires orientaux de la rivière Milk	Alberta, Saskatchewan et Montana	Traité des eaux limitrophes, 1909, et ordonnance de la CMI, 1921	Division à parts égales des débits naturels, le Canada ayant des droits antérieurs sur la St. Mary, et les É.-U. sur la Milk
Rivière Souris	Saskatchewan, Manitoba et Dakota du Nord	Accord concernant l'approvisionnement en eau et la protection contre les crues, 1989	60-40 Sask.-Dakota du Nord, 50-50 les années sèches, avec débit minimum saisonnier au Manitoba
Rivière Poplar	Saskatchewan et Montana	Recommandations de la CMI de 1977, non adoptées	Division à parts égales recommandée et appliquée officieusement

b) Fédéral - Provincial - Territorial

Bassin	Gouvernements riverains	Autorisation	Formule
Cours d'eau des Prairies s'écoulant vers l'Est	Alberta, Saskatchewan et Manitoba	Accord-cadre sur la répartition, 1969	Alb.-Sask. et Sask.-Man. se divisent le débit naturel à parts égales, avec débit minimum pour la rivière Saskatchewan Sud à la frontière Alberta-Saskatchewan
Fleuve Mackenzie	C.-B., Alb., Sask., T.N.-O. et Yukon	Accords bilatéraux à négocier pour 7 croisements frontaliers Répartition?	Accords bilatéraux à négocier pour 7 croisements frontaliers Répartition?

*Répartition limitée à l'utilisation du débit pour la production hydroélectrique non incluse (p. ex., Traité de la dérivation des eaux de la rivière Niagara).

Tableau 2. Le Canada, pays producteur d'hydroélectricité

Région	Barrages*		Dérivations	
	Capacité de stockage 10^9 m^3	% de la capacité pour l'hydroélectricité	Débit annuel moyen, m^3/s	% du débit pour l'hydroélectricité
Atlantique	79	99	740	99
Québec	423	99	1854	100
Ontario	55	73	576	89
Prairies	113	90	940	92
Colombie-Britannique	176	95	340	99
Canada	846	96	4450	97

Sources : Association canadienne des barrages (2003); Day et Quinn (1992) (mis à jour en 2003).
* Tous les grandes digues, sauf les digues à stériles.

Comme les changements à venir, dont le réchauffement climatique et l'accroissement de la population, se conjugueront pour exercer davantage de pression sur les ressources disponibles, les répartitions interprovinciales et internationales susmentionnées – fondées principalement sur des pourcentages du débit disponible plutôt que sur des droits absolus d'utilisation du débit – ont l'avantage d'offrir plus souplesse que la plupart des initiatives de partage de l'eau déjà mises de l'avant aux États-Unis. Dans tous les cas, les parties sont parvenues à éviter les conflits prolongés qui ont affecté un certain nombre d'accords inter-États de l'Ouest américain (Hundley, 1966).

Reste à savoir si le principe de la répartition des débits d'eau dans l'Ouest s'étendra à d'autres bassins ou régions, où les pénuries ne sont pas aussi graves ou répandues. La dernière région où le principe de la répartition devra être défendu sera sans doute le Nord-Ouest. Les gouvernements fédéraux, provinciaux et territoriaux se sont en effet mis d'accord sur des principes de gestion des eaux du bassin du fleuve Mackenzie, mais les négociations bilatérales concernant la majeure partie des sept croisements transfrontaliers sont à peine commencées. Ces négociations, si elles aboutissent, pourraient conduire à l'application d'exigences quantitatives en matière de débit, de distribution saisonnière ou de qualité.

Deux incertitudes demeurent en ce qui concerne les lois provinciales sur l'appropriation et les accords de répartition interprovinciaux. L'une de ces incertitudes est la question du titre autochtone associé à l'eau, pour lequel il n'existe aucune disposition ni dans l'*Acte d'irrigation du Nord-Ouest* de 1894 ni dans la législation provinciale subséquente. Quelques bandes contestent l'établissement, par le gouvernement, de droits d'appropriation qui ne tiennent pas compte de leurs utilisations riveraines non liées à la consommation. L'autre incertitude entoure l'applicabilité légale de l'accord interprovincial sur les cours d'eau des Prairies s'écoulant vers l'Est, et ce, malgré une clause obligeant les parties à maintenir la législation accordant la compétence à la cour fédérale (Saunders, 1988). Si les parties ne peuvent s'entendre sur la façon d'interpréter les diverses dispositions de l'accord, ou si une partie retire simplement son consentement à l'application de la compétence de la cour fédérale, il pourrait y avoir des conséquences de nature tant juridique que politique.

Dérivation entre bassins et prélèvement

Les barrages et les ouvrages de dérivation vont normalement ensemble : l'eau est accumulée derrière un barrage, puis retirée de son cours naturel pour être transférée ailleurs dans le même bassin hydrographique ou dans un autre bassin. Le présent chapitre porte sur les dérivations entre bassins, tandis que le chapitre suivant traitera des effets des barrages et de leurs réservoirs.

Depuis nombre d'années, les projets de redistribution du débit des cours d'eau vers des régions affichant une plus grande demande, que ce soit pour la production d'électricité ou pour un autre usage, ont consisté à réaliser des dérivations qui font appel à des modifications du cours des chenaux d'écoulement, à des canaux, à des pipelines ou à d'autres moyens semblables. Plus récemment, des entrepreneurs ont également proposé de transporter l'eau en vrac avec des navires ou des camions-citernes, mais le recours à de tels moyens a été limité jusqu'à maintenant. Dans le présent chapitre, nous nous attarderons à ce que nous connaissons des effets de divers projets de transport de l'eau. La prochaine section traitera d'autres répercussions soulevées par les perspectives liées aux marchés étrangers.

Dérivation de Nechako-Kemano

En 1950, Aluminum Company of Canada (Alcan) a conclu un accord avec le gouvernement de la Colombie-Britannique afin de réaliser un projet d'aménagement hydroélectrique pour alimenter une aluminerie et une nouvelle agglomération urbaine dans le centreouest de

En 1950, Aluminum Company of Canada (Alcan) a conclu un accord avec le gouvernement de la Colombie-Britannique afin de réaliser un projet d'aménagement hydroélectrique pour alimenter une aluminerie et une nouvelle agglomération urbaine dans le centre-ouest de la province. Le projet (phase I) redirigeait en moyenne 115 mètres cubes par seconde d'eau de la rivière Nechako (bassin du Fraser) vers le bassin de la rivière Kenamo à l'ouest, par un tunnel traversant la chaîne côtière, avec une dénivellation totale 16 fois plus élevée que celle des chutes Niagara. En échange de l'investissement effectué par l'entreprise, la province a concédé, à perpétuité et pour une somme minime, les droits sur une très vaste zone et beaucoup de ses richesses naturelles - terres agricoles, parcs, eau, forêts et poissons. Toutes les eaux visées par l'accord devaient être détournées avant 2000.

Les compromis ont été nombreux. En plus de permettre une importante production d'électricité pour Kitimat, la dérivation a légèrement atténué la menace d'inondation dans le bassin du bas Fraser mais a inondé une chaîne circulaire de lacs du parc Tweedsmuir populaires auprès des canoéistes. Le cours supérieur de la rivière Nechako a été pratiquement asséché pendant la construction du barrage Kenney et le temps qu'il a fallu pour remplir son réservoir. Après trois ans, le débit a été rétabli de 60 à 70 % grâce à de l'eau provenant non pas du barrage Kenney, mais de la Cheslatta, un tributaire de la Nechako. Le débit relativement important dans ce petit tributaire a creusé un profond canal dans les sédiments non consolidés et déposé d'énormes volumes de sédiments dans le cours supérieur de la Nechako (Kellerhals et al., 1979). Un petit barrage construit près de l'embouchure de la Cheslatta a provoqué l'inondation de maisons et d'un cimetière de la collectivité indienne locale. Les habitants ont dû déménager très rapidement dans un autre secteur et s'adapter à un mode de vie peu familier (Gomez-Amaral et Day, 1987), ce qui a été à l'origine de demandes de réparation pour leurs pertes.

À partir du milieu des années 1970, le débit de la Nechako a été graduellement réduit en raison de l'augmentation de la production d'électricité par Alcan à la centrale de Kemano. En 1980, le ministre fédéral des Pêches s'est présenté devant les tribunaux pour forcer Alcan à laisser s'écouler plus d'eau pour protéger les saumons contre l'assèchement du lit du cours d'eau, l'envasement et les températures plus élevées, le canal de la Nechako étant trop large pour le débit restant. Depuis lors, 30 % du débit antérieur à la dérivation a été rétabli dans la Nechako. Pendant ce temps, Alcan a proposé de profiter pleinement des droits qui lui ont été conférés en 1950, à savoir détourner tout le débit du cours supérieur de la Nechako plus celui de son tributaire, la Nanika, du réseau hydrographique de la rivière Skeena, augmentant de ce fait la dérivation vers la centrale électrique Kemano de 115 à 202 m^3/s (Rosenberg et al., 1987). L'achèvement du projet Kemano (phase II), après moult controverses, a été rejeté par étapes, en commençant par un accord de règlement remontant à 1987. Cependant, Alcan demeure intéressés à réaliser un projet, dont les coûts seraient partagés avec les gouvernements provincial et fédéral et les intérêts locaux, qui permettrait le rejet d'eau froide du barrage Kenney, ce qui améliorerait le débit et la température pour les populations de poissons de la Nechako, mais qui en entraînerait même temps la dérivation d'une plus grande quantité d'eau du réservoir Nechako vers la Kemano.

L'augmentation du débit de la Kemano à travers la ligne de partage des eaux a pu contribuer positivement au maintien des ressources halieutiques de ce cours d'eau, même temporairement et pour quelques espèces (Fisheries and Oceans Canada, 1984), à la production d'énergie hydroélectrique et, d'une manière plus générale, à la croissance de l'économie régionale de la région de Kitimat. Par ailleurs, on a attribué aux émissions de fluorure au cours des deux premières décennies d'exploitation de l'aluminerie la destruction de forêts et d'habitats aquatiques ainsi que des problèmes de santé chez des travailleurs.

L'absence de données à long terme fiables sur les débits et les écosystèmes des bassins du Fraser et de la Kemano rendent les effets des dérivations difficiles à mesurer. À partir de la fin des années 1980, un certain nombre de comités composés de représentants des gouvernements, de la société civile et d'Alcan se sont penchés sur ces questions. Les responsables du Programme de conservation des ressources halieutiques de la Nechako, après 15 ans d'étude, n'ont pas encore présenté de rapport concernant les effets des dérivations sur les populations de saumons. De même, les responsables d'un programme de rétablissement de l'esturgeon dans la Nechako n'ont pas a encore produit de rapport sur les causes du déclin local de cette espèce. Le Nechako Watershed Council a été constitué dans le cadre du processus lié au Nechako Environmental Enhancement Fund (NEEF), qui découle de l'accord de 1997 conclu entre la Colombie-Britannique et l'Alcan aux fins du règlement des conflits juridiques entre les deux parties. Le Conseil du bassin du Fraser (2002) facilite des travaux du Nechako Watershed Council sur les régimes d'écoulement créés par l'ouvrage de rejet d'eau froide que l'on propose de construire au barrage Kenney pour satisfaire aux exigences d'un vaste éventail d'intervenants.

Un demi-siècle s'est écoulé depuis que cet aménagement majeur à des fins de dérivation entre bassins a commencé à fonctionner. Toutefois, l'absence de données repères sur l'ensemble des cours d'eau affectés a empêché de comprendre et de corriger les changements induits. Voilà qui illustre clairement la nécessité non seulement d'études approfondies sur l'hydrologie et d'autres composantes biophysiques des écosystèmes avant qu'une perturbation d'importance ne soit autorisée, mais aussi d'une surveillance continue après l'achèvement d'ouvrages.

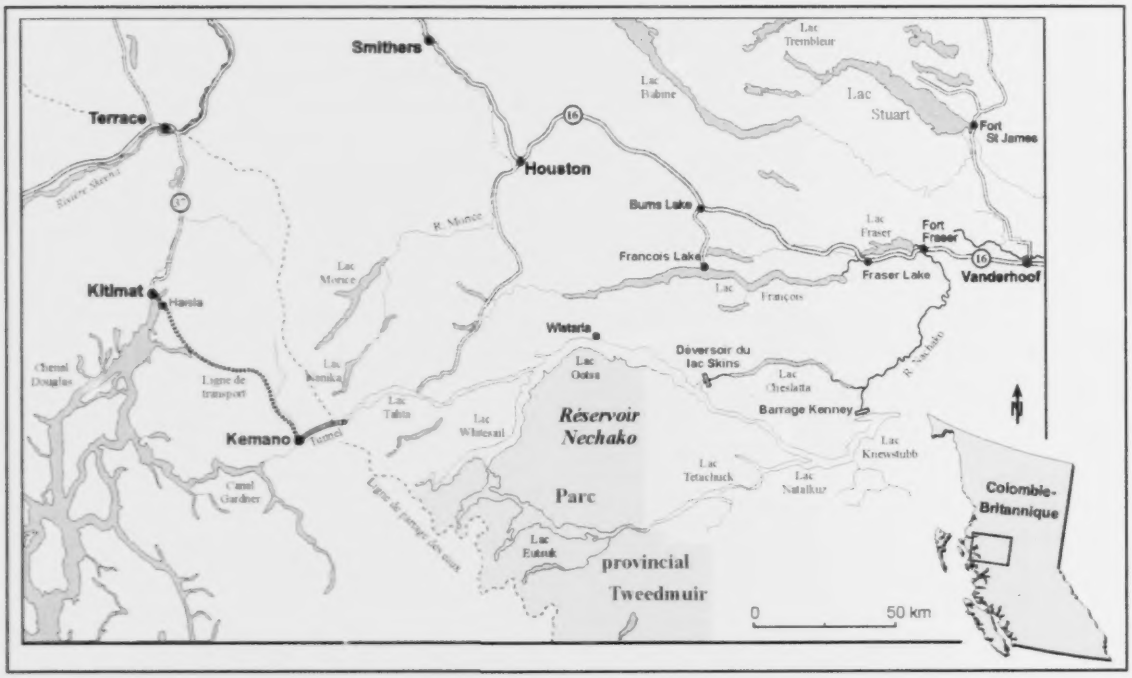


Figure 1. Dérivation de Nechako-Kemano.

Au Canada, l'environnement est propice à la manipulation des eaux de surface. Plus impressionnante encore que l'abondance générale de l'eau douce de surface est la densité des lacs et des cours d'eau reliés ou quasi reliés entre eux qui composent notre réseau hydrographique. Ces lacs et ces cours d'eau sont le legs du Pléistocène, époque caractérisée par une succession d'avancées et de reculs des fronts glaciaires en avant desquels les eaux de fonte cherchaient une voie pour s'écouler, créant et abandonnant des chenaux ou, simplement, ruisselant au hasard, d'une dépression à l'autre. Les lieux où la nature avait tracé la voie ont été rapidement utilisés par l'homme, qui a rouvert de vieux déversoirs comme celui des Grands Lacs, reliant Chicago au bassin hydrographique du Mississippi et celui reliant la rivière Saskatchewan Sud à la vallée de la Qu'Appelle. Ainsi, les dérivations canadiennes ont été réalisées à des coûts inférieurs à celles de beaucoup d'autres régions du monde du fait qu'elles n'ont nécessité que de courtes excavations entre des plans d'eau proches et ont pu bénéficier de l'écoulement par gravité de canaux en grande partie naturels.

Il n'existe aucun inventaire officiel des dérivations ou des transferts entre bassins au Canada. Deux critères ont été adoptés pour qualifier les dérivations :

1. l'eau dérivée ne revient pas au cours d'eau d'origine ou au réseau parent à moins de 25 km du point de prélèvement;
2. la dérivation annuelle moyenne n'est pas inférieure à 0,5 mètre cube par seconde (ou un volume de 10 000 décamètres cubes).

Ces critères nous permettent d'éliminer les prélèvements localisés et de moindre importance effectués par bon nombre de municipalités, de centrales électriques, d'irrigateurs et d'entreprises de camionnage.

On trouve des projets de dérivation entre bassins dans presque toutes les provinces. Le total du débit d'eau détourné actuellement entre les bassins hydrographiques est énorme – approximativement 4500 mètres cubes par seconde. Aucun autre pays ne détourne autant l'eau ou ne concentre autant de débits pour un usage unique : la production d'énergie hydroélectrique (tableau 2). Des quelque 55 projets relevés, les plus récents et également les plus importants, les installations électriques de la rivière La Grande (baie James) au Québec, la dérivation Churchill-Nelson au Manitoba et le projet de Churchill Falls au Labrador, sont tous des projets de production d'énergie hydroélectrique pris en charge par les pouvoirs publics (Day et Quinn, 1992). Le profil national des dérivations entre bassins a à peine changé au cours de la dernière décennie.

Les avantages de tels projets sont réels et considérables. Les coûts biophysiques et socio-économiques de tels projets, quoique difficiles à évaluer, couvrent un vaste éventail et sont ressentis sur de longues périodes. La dérivation de Nechako-Kemano (figure 1) en est un bon exemple.

Il n'y a pas que le projet Nechako-Kemano qui inquiète. D'autres problèmes liés aux dérivations et prélèvements d'eau se sont manifestés. À la différence des barrages, qui empêchent dans la plupart des cas le passage des

poissons, les dérivations entre bassins risquent d'occasionner le transfert de poissons indésirables et de parasites, bactéries et virus connexes présents dans l'eau d'un bassin hydrographique ou d'une source éloignée vers un autre bassin où ils causeront des dommages. C'est notamment pour protéger la pêche commerciale dans le lac Winnipeg contre des espèces envahissantes comme l'alose noyer et l'éperlan que le Canada et le Manitoba insistent pour que la dérivation de Garrison, dans le Dakota du Nord, et des versions plus récentes de ce projet ne détournent pas l'eau du Missouri dans la rivière Rouge, qui s'écoule vers le Nord (Kellow et Williamson, 2001). Ce problème est plus critique lorsqu'il est question de franchir des barrières naturelles qui existent depuis des milliers d'années, comme les lignes de partage des eaux continentales (comme dans le cas de Garrison) ou les océans séparant des continents. Présentement, presque les trois quarts des 160 espèces exotiques qui ont réussi à pénétrer dans les Grands Lacs, principalement par l'intermédiaire de l'eau de lest des navires, sont de sources eurasiennes, et il en coûte des milliards de dollars pour réparer les dommages causés aux prises d'eau et préserver les espèces indigènes (Schindler, 2001).

Bordé par trois océans, le Canada ne peut se permettre de faire abstraction de la contribution des effluents d'eau douce à l'environnement marin. Les eaux de fonte du printemps provenant de l'intérieur induisent des remontées d'eau salée des grandes profondeurs riches en nutriments vers la surface, à un moment où les organismes marins en profitent le plus. Les barrages et les installations de dérivation réduisent déjà le courant d'eau douce naturel du printemps de nombre de cours d'eau, et on constate des effets néfastes (sédimentation et perte de substances nutritives) ainsi que des réductions des populations de poissons importantes pour les écosystèmes côtiers (Neu, 1982). Hormis sa distribution saisonnière, la quantité d'eau douce que l'on peut retirer « sans risque » d'un cours d'eau avant qu'elle n'entre dans l'environnement marin est une question à laquelle il n'existe pas de réponse simple (Healey, 1992).

Les rapides Ogoki abandonnés. Vue vers le nord-est (baie James) à partir du barrage Waboose. Toutes les eaux de l'ancien cours d'eau sont dérivées vers le sud dans les lacs Nipigon et Supérieur la plupart du temps.

On a fait quelques propositions de dérivation de cours d'eau ou de transport d'eau par bateau ou par camion en alléguant qu'elles ne visaient que de petits volumes comparativement aux ressources disponibles. Cependant, le précédent que créerait même un petit prélèvement, comme celui proposé par le Nova Group en 1998 et qui consistait à transférer par bateau 60 000 litres par an du lac Supérieur, risque d'être invoqué par d'autres promoteurs, dont les retraits cumulatifs pourraient engendrer une situation beaucoup plus grave (Windsor, 1992).

Qui plus est, le « surplus » que certains entrepreneurs voient dans les vastes lacs de l'Amérique du Nord est illusoire. Les Grands Lacs constituent un bon exemple. Un peu moins de 1 % de leur volume est renouvelé en moyenne chaque année, le reste étant un héritage de la fonte des glaciers survenue durant le Pléistocène, il y a des milliers d'années (Commission mixte internationale, 2000).

Exportation

Les dérivations entre bassins sont répandues au Canada, mais aucune n'aboutit au sud de la frontière. De plus, le premier navire transportant de l'eau en vrac du Canada vers des marchés étrangers n'a pas encore levé l'ancre. Et ce n'est pas parce que des entrepreneurs n'ont pas exercé de pressions sur les gouvernements fédéral et provinciaux pour qu'ils approuvent leurs plans et qu'ils ne poursuivent pas leurs démarches en ce sens. Quant à l'eau embouteillée, son exportation est de bien faible importance comparativement aux volumes proposés pour les dérivations entre bassins ou le transport d'eau en vrac; elle n'atteint en effet que le niveau de l'exportation et de l'importation d'autres boissons mises en bouteille (Hidell-Eyster International, 1999).

Les études économiques de propositions d'intérêts internationaux relatives à l'exportation de l'eau (Government of Newfoundland and Labrador, 2001; Gouvernement du Québec, 2000; Quinn et Edstrom, 2000) indiquent que celles-ci ne sont pas viables actuellement, comparativement à des solutions de rechange telles que la conservation, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation, la redistribution entre les utilisateurs et le dessalement dans les régions confrontées à des pénuries d'eau. En conséquence, il est peu probable que le Canada subisse, à court et à moyen terme, de réelles pressions pour exporter de l'eau douce. À plus long terme, cependant, un marché potentiel tel que le Sud-Ouest américain peut épuiser certaines des solutions de rechange locales plus aisément applicables et

commencer à envisager plus sérieusement de se tourner vers le Canada (United States-Mexico Foundation for Science, 1998). Le réchauffement climatique, naturellement, pourrait accélérer les choses.

L'opinion publique canadienne n'a jamais été favorable à l'exportation de l'eau depuis que cette question a commencé à être débattue, il y a quatre décennies. Les experts et le public partagent depuis longtemps une inquiétude, à savoir que si le robinet était ouvert au puissant marché des États-Unis, il serait pratiquement impossible de le fermer. Plus récemment, cette inquiétude s'est accrue en raison des négociations sur le commerce international et de la signature de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA) en particulier, qui pourrait imposer des contraintes à la capacité d'une nation de limiter l'exportation de l'eau.

Devant la tournure des événements et les propositions continues pour exporter l'eau, le gouvernement du Canada (1999) a annoncé une stratégie basée sur des raisons environnementales plutôt que sur des raisons commerciales. Essentiellement, les bassins hydrographiques deviendraient le critère géographique pour empêcher les prélèvements d'eau en vrac. Conscient des responsabilités provinciales en matière de ressources naturelles, le gouvernement fédéral a proposé que tous les gouvernements du Canada interdisent par voie législative les prélèvements d'eau en vrac dans les bassins hydrographiques relevant de leur compétence. Protéger l'eau, son intégrité écologique et son utilisation à la source, à l'intérieur des frontières naturelles plutôt que des frontières politiques, est l'idée lancée pour éviter les prélèvements en vrac pour usage au Canada comme à l'étranger et se prémunir ainsi de toute discrimination inhérente à d'éventuelles revendications en matière de commerce international.

Malgré les réserves exprimées par quelques groupes d'intérêt environnementaux et autres au sujet de cette stratégie (Gleick et al., 2002), les gouvernements fédéral et provinciaux disposent maintenant de lois, de règlements ou de politiques qui interdisent tout prélèvement en vrac d'eau douce qu'ils appliquent d'ordinaire aux bassins hydrographiques relevant de leur compétence. Les dérivations existantes entre bassins, cependant, sont considérées comme exclues en raison de leur antériorité et ne peuvent être remises en cause.

Certains allèguent que le Canada a une obligation morale de partager son eau abondante avec les populations des pays et des régions en développement qui éprouvent de plus en plus de difficultés à combler leurs besoins. Le gouvernement canadien estime qu'il existe pour ces populations des solutions de rechange plus viables que l'importation par bateau sur de longues distances. Ces solutions, y compris la conservation, le recyclage, la réutilisation et la redistribution des ressources locales ainsi que l'amélioration des systèmes de traitement et de distribution de l'eau, sont d'ailleurs privilégiées par la communauté de l'aide internationale. Les amendements apportés à la *Loi fédérale du Traité des eaux limitrophes internationales*, qui sont entrés en vigueur en décembre 2002 notamment pour protéger les eaux limitrophes du Canada contre les prélèvements hors bassin, prévoient également une exception pour les besoins humanitaires à court terme.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

L'état des ressources en eau douce du Canada sous un régime d'attribution aux utilisateurs et de prélèvement dans les bassins d'origine est un sujet de recherche légitime même si, comme dans le cas présent, il n'est limité qu'aux préoccupations relatives à la quantité. Voici quelques sujets de recherche importants.

- En ce qui concerne l'appropriation de droits sur l'eau par des utilisateurs collectifs ou individuels (districts d'irrigation, p. ex.), on a commencé, en Alberta, à revoir certaines règles inflexibles afin de permettre la commercialisation des droits sous licence entre utilisateurs, que le type d'utilisation ou l'emplacement dans le bassin hydrographique change ou non. Des réformes semblables ont été réalisées dans nombre d'États de l'Ouest américain et dans le bassin Murray-Darling, en Australie. Cette innovation permettra-t-elle la résolution de conflits entre les utilisateurs dans la région aride des Prairies canadiennes lorsque les droits sur un plus grand nombre de sources d'eau auront été entièrement appropriés? Quels genres de protection devrait-on accorder pour assurer les utilisations sur place et pour satisfaire aux besoins d'autres utilisateurs et collectivités qui pourraient être touchés?
- Pour ce qui est de la répartition, est-ce que la possibilité qu'une province se retire d'un accord interprovincial existant affaiblit les perspectives d'accords semblables entre les gouvernements dans le bassin du Mackenzie ou ailleurs? Des questions de droit complexes demeurent en ce qui concerne l'applicabilité de ces accords et les principes juridiques de base qui s'appliqueraient en cas de conflit entre pouvoirs publics concernant l'utilisation de l'eau.
- La répartition est basée sur un calcul du débit naturel, c.-à-d. les débits qui se seraient produits en l'absence de stockage et d'utilisation. Lorsque la consommation d'eau enfreint presque les droits d'un territoire situé en amont, par exemple pendant des périodes de sécheresse, les incertitudes inhérentes à ce calcul prennent de l'importance. Quelles nouvelles mesures de surveillance et données et quels modèles nouveaux devra-t-on utiliser pour réduire le potentiel de conflits relatifs à l'eau?

- Actuellement, il n'existe aucun inventaire national des dérivations entre bassins. Un rapport factuel décrivant les projets, leur historique et leur fonctionnement constituerait un point de départ utile pour comprendre l'expérience et les préoccupations des Canadiens concernant cette question. Ce rapport aurait dû d'ailleurs être produit il y a longtemps.
- L'amélioration de la prévision du changement morphologique, tant du chenal distributeur que du chenal récepteur, exigera des efforts soutenus de surveillance et de documentation des différents types de dérivations, une connaissance améliorée des processus fluviaux et l'élaboration de modèles informatiques plus pratiques. Un résumé exhaustif du changement morphologique par l'intermédiaire d'études de cas serait un ajout valable aux connaissances sur les projets de dérivation au Canada.
- La quantité d'eau qui peut être prélevée dans un bassin hydrographique sans compromettre son intégrité écologique n'est pas une question à laquelle on peut répondre de façon définitive ou générale. Cependant, des recherches sur la résilience écologique, le risque et l'incertitude pourraient fournir des renseignements utiles pour de futures évaluations environnementales spécifiques ultérieures de projets de dérivation entre bassins ou de prélèvement.
- Les débits des cours d'eau ont de profonds effets sur les processus physiques, chimiques et biologiques des eaux côtières, effets qui peuvent s'étendre sur de longues distances dans les estuaires et en mer. Tout projet à grande échelle ou toute série de petits projets de prélèvement d'eau douce à l'échelle régionale en amont de la zone marine menace la stabilité et la productivité des niveaux trophiques inférieurs, des poissons et des mammifères en aval. Il faut faire des recherches fondamentales pour déterminer les causes des corrélations statistiques établis dans des régions comme le fleuve Saint-Laurent, son estuaire et les eaux côtières adjacentes.
- Les directives et les règlements exigeant que les navires échangent l'eau de lest en mer n'ont fait que ralentir l'introduction d'espèces exotiques, et la situation s'est détériorée davantage en raison des nombreux raccordements entre bassins qui ont permis aux organismes envahisseurs de gagner le cœur du continent. La barrière électrique expérimentale mise en place à Chicago n'est que l'une des premières mesures prises pour empêcher des espèces comme la grémille de se répandre au-delà des Grands Lacs et d'entrer dans le bassin hydrographique du Mississippi et la carpe d'Asie d'aller dans le sens inverse. Il est temps de revoir la technologie et la réglementation relative à l'échange de l'eau de lest en élaborant des systèmes de filtration/d'exclusion adaptés aux navires. Compte tenu des coûts de la lutte contre ces organismes une fois qu'ils sont établis, il pourrait être intéressant pour les gouvernements de subventionner l'industrie pour qu'elle mettre les innovations nécessaires en application.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Michael Church, professeur de géographie à l'University of British Columbia, à Vancouver, et la firme Bob Halliday, R. Halliday & Associates, Ltd, de Saskatoon, qui ont agi à titre de réviseurs externes et suggéré un certain nombre d'améliorations à diverses parties du texte.

Références

Alberta Environment. 2003. « Water for life: Alberta's strategy for sustainability ». Ébauche pour examen public. Edmonton (Alberta).

Canadian Dam Association. 2003. « Dams in Canada (CD) ». Edmonton.

Day, J.C. et F. Quinn. 1992. « Water diversion and export: learning from Canadian experiences ». « Department of Geography Publication Series No. 36 », Université de Waterloo, Waterloo (Ontario).

Pêches et Océans Canada. 1984. « Toward a fish habitat decision on the Kemano completion project: a discussion paper ». Vancouver.

Fraser Basin Council. 2002. « Basin news », novembre. Vancouver.

Gleick, P., G. Wolff, E. Chalecki et R. Reyes. 2002. « Globalization and international trade of water », p. 33-56. *Dans* P. Gleick (s. la dir. de), « The world's water: the biennial report on freshwater resources 2002-2003 ». Island Press, Washington, D.C.

Gomez-Amaral, J.C. et J.C. Day. 1987. « The Kemano diversion: a hindsight assessment », p. 137-152. *Dans* W. Nicholaichuk et F. Quinn (s. la dir. de), « Proceedings of the Symposium on Interbasin Transfer of Water: Impacts and Research Needs for Canada. CWRA and NHRC », Saskatoon.

Gouvernement du Canada. 1999. Mise en œuvre d'une stratégie visant à prévenir le prélèvement à grande échelle des eaux du Canada, y compris les eaux destinées à l'exportation. Communiqué, 10 février 1999, Ottawa.

Gouvernement du Québec. 2000. L'eau : ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur. Rapport de la Commission sur la gestion de l'eau au Québec.

Government of Newfoundland and Labrador. 2001. « Export of bulk water from Newfoundland and Labrador. A Report of the Ministerial Committee Examining the Export of Bulk Water ». St. John's.

Healey, M. 1992. « The importance of fresh water inflows into coastal ecosystems », p. 255-268. *Dans* J.E. Windsor (s. la dir. de), « Water export: should Canada's water be for sale? Proceedings of a Conference held in Vancouver. CWRA ».

Hidell-Eyster International. 1999. « A perspective on water: The United States and Canada bottled water markets and bottled and bulk water trade ». Rapport produit au titre

d'un contrat pour le compte de la Commission mixte internationale. Ottawa.

Hundley Jr., N. 1966. « Dividing the waters ». University of California Press, Los Angeles.

Commission mixte internationale. 2000. Rapport final sur la protection des eaux des Grands Lacs présenté aux gouvernements du Canada et des États-Unis d'Amérique. Ottawa et Washington, D.C.

Kellerhals, R., M. Church et L.B. Davies. 1979. « Morphological effects of interbasin river diversions ». Can. J. Civil Eng. 6(1): 18-31.

Kellow, R.L. et D.A. Williamson. 2001. « Transboundary considerations in evaluating interbasin water transfers. Transboundary water transfers. Proceedings of the 2001 Water Management Conference, U.S. Committee on Irrigation and Drainage ».

Neu, H. 1982. « Man-made storage of water resources: a liability to the ocean environment? » Mar. Poll. Bull. 13(2): 44-47.

Percy, D.R. 1988. « The framework of water rights legislation in Canada ». Institut canadien du droit des ressources, Université de Calgary.

Quinn, F. et J. Edstrom. 2000. « Great Lakes diversions and other removals ». Can. Water Resour. J. 25(2): 125-151.

Rosenberg, D.M., R.A. Bodaly, R.E. Hecky et R.W. Newbury. 1987. « The environmental assessment of hydroelectric impoundments and diversions in Canada », p. 71-104. *Dans* M.C. Healey et R.R. Wallace (s. la dir. de), « Canadian aquatic resources. Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences 215 », Pêches et Océans Canada.

Saskatchewan-Nelson Basin Board. 1972. « Water supply for the Saskatchewan-Nelson basin. Report of the SNBB, Canada, Alberta, Saskatchewan and Manitoba ». Regina (Sask.). Sommaire du rapport en français.

Saunders, J.O. 1988. « Interjurisdictional issues in Canadian water management ». Institut canadien du droit des ressources, Université de Calgary.

Schindler, D.W. 2001. « The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 58: 18-29.

United States - Mexico Foundation for Science. 1998. « Water and health at the U.S. - Mexico border: science, technology and policy issues. Proceedings of a workshop at Tijuana, Baja California ».

Windsor, J.E. (s. la dir. de). 1992. « Water export: should Canada's water be for sale? Proceedings of a conference in Vancouver, sponsored by the Canadian Water Resources Association ».

Chapitre 2

BARRAGES, RÉSERVOIRS ET RÉGULATION DU DÉBIT DES EAUX

Terry D. Prowse[1], Fred J. Wrona[2] et Geoff Power[3]

[1] Environnement Canada, Institut national de recherches sur les eaux, Victoria (C.-B.)

[2] Environnement Canada, Institut national de recherches sur les eaux, Saskatoon (Sask.)

[3] Université de Waterloo, Waterloo (Ont.)

Situation actuelle

Au Canada et partout dans le monde, on a construit des barrages afin de réduire les risques liés aux inondations, d'aménager les cours d'eau pour en tirer de l'énergie pour l'industrie et le commerce, et d'aider à assurer une source d'eau fiable pour les utilisations domestiques, industrielles et agricoles. Bien que les barrages fassent partie intégrante du développement agricole ou industriel, ce sont des structures qui modifient les écosystèmes fluviaux à bien des échelles spatiales et temporelles différentes (p. ex., Calow et Petts, 1994; Petts, 1984). Le rôle des processus qui interviennent dans ces modifications sous les climats froids présente un intérêt particulier pour le Canada (p.ex., Prowse et Conly, 1996; Rosenberg et al., 1997).

En retenant les eaux et en allongeant le temps de séjour, les barrages peuvent entraîner des changements de température et de la composition de l'eau et ainsi influer sur la vitesse des processus biologiques et chimiques. Les barrages font obstacle au transport amont-aval des nutriments et des organismes, nuisant ainsi aux échanges physiques et biologiques. Ils provoquent aussi des changements temporels et quantitatifs du débit et du mouvement des sédiments et de la glace vers l'aval, modifiant ainsi les cycles biogéochimiques ainsi que la structure et la fonction de l'habitat aquatique et riverain qu'on retrouve en aval. L'effondrement occasionnel des barrages présente des risques en aval pour les aménagements et l'écologie des eaux.

Inventaire des barrages existants au Canada

Bien qu'il n'y ait eu aucun inventaire national couvrant les barrages de toutes tailles au Canada, l'Association canadienne des barrages (ACB) procède périodiquement à une évaluation et transmet les données à la Commission internationale des grands barrages (CIGB). En 2000 (Canadian Dam Association, 2003), le Canada comptait 849 grands barrages (≥10 m de hauteur de la crête) en exploitation ou en construction. Cette évaluation n'inclut pas les digues des bassins de stockage des stériles, ce qui ajouterait environ 84 barrages de plus au total. Une forte majorité (70 %) des grands barrages au Canada ont été construits uniquement pour la production d'hydroélectricité. Parmi les autres, 7 % ont été érigés principalement pour l'alimentation en eau et 6 % pour l'irrigation, surtout dans les provinces des Prairies. Les autres servent à divers usages, depuis la lutte contre les inondations jusqu'à la navigation, les loisirs ou une combinaison de ces usages.

Malheureusement, les données relatives au stockage d'eau et aux territoires inondés ne sont pas cataloguées pour tous les grands barrages. Le Canada possède cependant dix des 40 plus grands barrages du monde mesurés en fonction de la capacité brute de leur réservoir (ICOLD, 2003). La capacité de stockage des 849 plus grands réservoirs est suffisante pour contenir un volume d'eau équivalant au volume des eaux de ruissellement s'écoulant en deux ans dans tout le Canada, ou à environ le quart du volume des cinq grands lacs de la région laurentienne. Bien que le stockage d'eau dans des réservoirs augmente l'évaporation, l'effet total ne peut être estimé parce qu'il manque des données sur la superficie des réservoirs et la profondeur de l'eau. Les pertes les plus importantes surviennent dans les réservoirs peu profonds et aux endroits où des barrages ont été construits dans des zones hydroclimatiques caractérisées par des taux naturellement élevés d'évaporation des lacs (den Hartog et Ferguson, 1978), comme le lac Diefenbaker dans la partie centrale des Prairies (p. ex., Canada-Saskatchewan, 1991).

Il n'existe aucun inventaire national des petits barrages au Canada, mais on estime que leur nombre est beaucoup plus élevé que celui des grands barrages. En Colombie-Britannique, par exemple, on compte environ 2 500 petits barrages (Jolley, comm. pers.), mais 99 seulement sont classés comme étant de « grands barrages » (Canadian Dam Association, 2003). De même, la banque de données du Québec comporte 5 144 barrages d'au moins 1 m de haut (Lavallée, comm. pers.) mais seulement 333 grands barrages (Canadian Dam Association, 2003). Si l'on applique à l'ensemble du pays le ratio moyen grands barrages/petits barrages de ces deux régions, on peut conclure que le Canada possède au moins 10 000 barrages, petits et grands. L'effet du

stockage et de l'évaporation de l'eau de tous ces ouvrages est encore plus difficile à évaluer que pour les grands barrages parce qu'on ne possède aucune donnée sur la capacité de stockage et la superficie inondée.

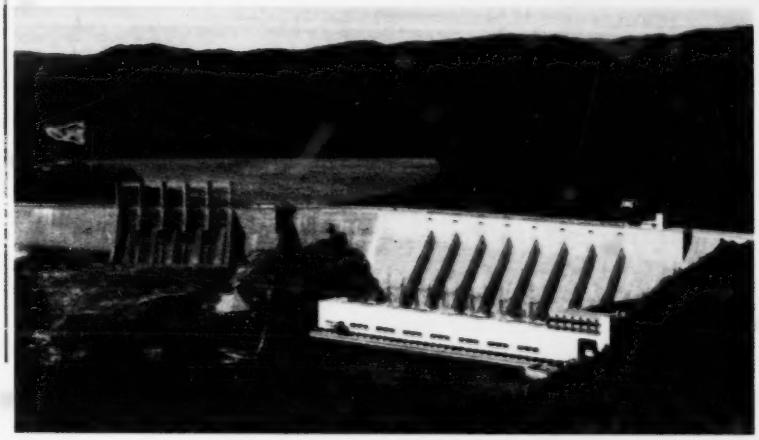
Effets de la régulation

Niveaux d'eau et débits

En général, on observe deux grands changements des paramètres hydrauliques après la construction d'un réservoir. Tout d'abord, le milieu du bassin d'amont du barrage se transforme, passant de milieu lotique (c.-à-d. d'eau courante) à un milieu lentique (c.-à-d. d'eau stagnante), avec des modifications connexes dans les processus hydrologiques et écologiques. Ensuite, les variations diurnes et saisonnières de la demande d'eau ou d'énergie hydroélectrique provoquent des variations du débit à court et à long terme, lesquelles sont très différentes de celles que l'on enregistre dans une rivière non aménagée.

De façon générale, le réservoir remplit deux fonctions : il augmente la charge hydraulique ou la différence de niveaux entre le point d'entrée et le point de sortie de la centrale, et permet le stockage d'eau en prévision des périodes de faible débit des eaux d'amont. Les centrales hydroélectriques sont dites « au fil de l'eau » lorsque seule la première fonction est importante. Ce type de centrales est couramment utilisé en aval de grands réservoirs (p. ex., le barrage Peace Canyon en aval du réservoir Williston) ou de lacs (entre autres les centrales électriques du réseau de la rivière Nelson, le stockage de l'eau étant assuré par le lac Winnipeg et d'autres lacs naturels). Dans ce cas, on doit simplement assurer le stockage d'un volume d'eau suffisant en amont pour équilibrer les débits et fournir la charge hydraulique requise par la centrale.

La capacité de stockage d'importantes quantités d'eau est une caractéristique commune aux grandes centrales hydroélectriques. La demande d'électricité est habituellement à son maximum en hiver et à son minimum en été, soit un contraste direct avec la disponibilité saisonnière naturelle de l'eau dans la plupart des régions, qui se caractérise par des quantités maximales d'eaux de ruissellement au printemps et en été, et des quantités minimales en hiver (sauf dans les cours d'eau de la côte ouest). Pour réduire cet écart entre la demande d'électricité saisonnière et la variabilité saisonnière du cycle hydrologique naturel, on stocke une grande quantité de l'eau de ruissellement en été, qu'on libère en hiver. Dans l'ensemble, la régulation entraîne l'égalisation de l'hydrogramme annuel, y compris l'amortissement des débits de pointe, en particulier là où le volume d'eau stockée dans des réservoirs est important par rapport au volume des eaux de ruissellement.



Barrage-poids de Manic 2A (Québec) Canada.

Le scénario ci-dessus décrit le type le plus courant de redistribution saisonnière des débits par la régulation, mais d'autres variations du régime hydraulique peuvent survenir selon la conception interdépendante des réseaux hydrologiques et hydroélectriques. Certains cours d'eau, par exemple, peuvent donner lieu à une baisse des débits tout au long de l'année parce qu'une partie de leur débit est dérivée afin d'alimenter une centrale hydroélectrique dans un autre réseau. Ce dernier enregistre alors une augmentation annuelle du débit, comme c'est le cas avec la dérivation de la rivière Churchill vers la fleuve Nelson au Manitoba, et des réseaux fluviaux Nechako et Kemano en Colombie-Britannique (voir l'analyse sur la dérivation au chapitre 1).

Dans les grands cours d'eau, les effets physiques et écologiques de la régulation du débit peuvent se faire sentir à plusieurs centaines de kilomètres en aval, ces effets étant parfois cumulatifs lorsqu'il y a une série de barrages. À titre d'exemple, on a enregistré d'importants effets sur le plan hydrologique, biogéochimique et écologique en aval dans l'estuaire du Saint-Laurent qui sont directement attribués aux effets cumulatifs résultant de l'aménagement de réservoirs hydroélectriques en amont (Neu, 1982a,b). Par ailleurs, les effets cumulatifs découlant de la construction de multiples barrages et barrages-chaussées suscitent de vives préoccupations en matière d'environnement pour la majorité des cours d'eau qui se déversent dans la baie de Fundy (Wells, 1999). Mais dans l'ensemble, les effets cumulatifs majeurs (p. ex., la dégradation de l'habitat dans les estuaires et la perturbation résultante des nutriments dans les zones extracôtières) n'ont pratiquement pas été quantifiés (Rosenberg et al., 1997, 2000).

Régime des glaces et régime sédimentaire

La glace fluviale fait partie intégrante du cycle hydrologique de la plupart des cours d'eau du Canada, beaucoup d'entre eux étant couverts de glace pendant au moins six mois par année. En outre, cette glace influe sur un certain nombre de processus qui régissent la période, la durée et l'ampleur des débits et des niveaux

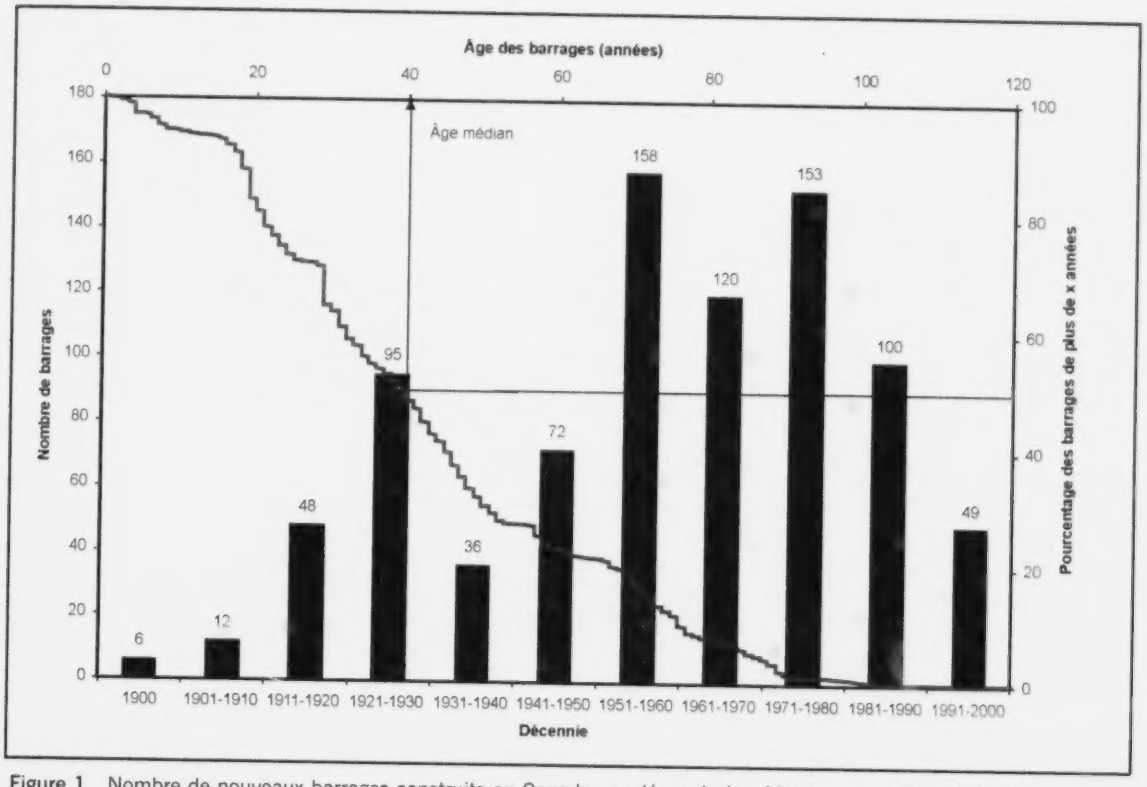


Figure 1. Nombre de nouveaux barrages construits au Canada par décennie (sauf les barrages des bassins à stériles/boues). La ligne indique le pourcentage des barrages de plus de x années. Données provenant de l'Association canadienne des barrages (2003).

d'eau (Prowse, 1994). Les hydrogrammes correspondants des débits et des niveaux d'eau varient beaucoup par rapport à ceux des régions plus tempérées, bien que l'on commence seulement à faire état de toute l'importance de ce facteur pour l'écologie aquatique hivernale (Prowse, 2001a,b). Toute modification du régime d'écoulement hivernal, comme la régulation au moyen de réservoirs, aura des impacts concomitants sur le régime des glaces et sur l'écologie hivernale connexe d'un cours d'eau. Ces glaces peuvent avoir une grande importance, puisqu'elles sont responsables de nombreuses conditions extrêmes au cours de l'année en cas d'événements hydrologiques comme les inondations et les débits d'étiage (p. ex., Prowse, 1994).

La régulation peut modifier grandement la période pendant laquelle la surface est gelée et même la présence de glace à cause de la décharge d'eau hypolimnique tempérée. Un débit accru ou de grandes fluctuations du débit durant l'hiver peuvent mener à des variations dans l'intégrité de la couverture de glace ainsi que dans l'emplacement et le nombre de points d'accumulation pour la formation initiale du couvert de glace. De plus, lorsque les débits sont élevés, il peut y avoir un épaississement et une plus grande rugosité du couvert de glace, des caractéristiques qui se combinent à des niveaux d'eau élevés, supérieurs à ceux qui sont enregistrés en l'absence de barrages et dans des conditions de fort débit. Une fois que la couverture de glace est établie, la régulation du débit peut entraver encore davantage la formation des glaces et même entraîner une débâcle en plein hiver et des inondations subséquentes.

La régulation des cours d'eau peut influer sur le régime de sédimentation du fait de la rétention de matériaux dans le réservoir et des modifications des processus d'érosion et de déposition en aval. La durée de vie utile des réservoirs est raccourcie lorsqu'on érige de petits barrages dans des cours d'eau dont la charge de sédiments est importante. La réduction progressive de la capacité de stockage de l'eau de ces réservoirs attribuable à l'accumulation de sédiments se solde par une capacité de rétention plus faible et peut entraîner en période de crue une incapacité à retarder le passage de l'eau en aval.

L'affouillement du chenal d'un cours d'eau juste en aval d'un réservoir est chose courante, mais le profil des modifications morphologiques est plus complexe en aval. Les variations du débit et du régime des crues ont des répercussions sur la capacité du chenal à laisser passer les sédiments et la capacité du réseau fluviatile d'entraîner les sédiments déposés durant les périodes de faible débit. Dans les grandes rivières alluviales, les

processus de dégradation se limitent aux premiers kilomètres ou à quelques dizaines de kilomètres en aval du point de régulation, et en général, la dégradation consécutive à une ou deux décennies de régulation se fait sentir sur une profondeur d'un à trois mètres (Church, 1995).

Plus loin en aval, là où les tributaires charrient des matériaux dans le cours d'eau, l'alluvionnement est plus commun que la dégradation. Les débits régulés plus faibles, notamment en l'absence des pointes de crue naturelles, ne peuvent transporter les matériaux produits par la dégradation en amont et ceux qui sont apportés par les tributaires. Lorsqu'il y a alluvionnement, les répercussions d'ordre morphologique varient selon le type de dépôts alluvionnaires. Les effets types peuvent se traduire par l'affouillement latéral, l'élargissement du chenal, le tressage et la diminution de la profondeur du débit d'eau moyen. Cependant, l'avancée successive d'espèces végétales sur les berges et jusque sur les plaines inondables abandonnées peut se solder par le rajustement du régime d'écoulement global et, en bout de ligne, le rétrécissement du chenal.

Un aspect critique des changements dans le régime de sédimentation est l'échelle temporelle. Bien que l'on puisse observer des modifications radicales au cours des premières années suivant la régulation du débit, le temps nécessaire pour qu'un réseau fluvial parvienne à un nouvel équilibre dépend du type de régulation, de la forme et de la composition du chenal ainsi que de la vitesse d'établissement de la végétation. Compte tenu de l'énorme volume de sédiments présents dans les grands cours d'eau du Nord et de la lenteur des transformations de la végétation connexe, la période durant laquelle s'opéreront les rajustements peut durer des siècles. Mais jusqu'à présent, aucun réseau fluvial au Canada n'a été étudié systématiquement pendant plus de quelques décennies (Church, 1995).

Qualité de l'eau

La qualité de l'eau peut être grandement altérée par les réservoirs. Les processus physiques, biogéochimiques et biologiques qui interviennent dans un réservoir peuvent modifier la température et la composition chimique de l'eau qui sort du réseau dans une mesure telle que la qualité de l'eau à sa sortie n'a plus rien à voir avec ce qu'elle était à son entrée. Le degré d'altération de la qualité de l'eau à l'échelle circadienne, saisonnière et/ou annuelle dépend de facteurs tels que le rapport surface/volume et la profondeur du réservoir; la géologie et la géochimie du sol de la région de captage environnante; la latitude du réservoir; les taux et l'ampleur de la sédimentation; les quantités et la période des apports d'eau ainsi que le temps de séjour et le niveau de productivité biologique du réservoir.

Les variations de température dépendent de la masse thermique du réservoir et de la surface donnant lieu à des échanges radiants, du temps de séjour, de la formation d'une thermocline et du fait que l'eau qui s'écoule provient de la surface ou d'une couche profonde. À titre d'exemple, dans les réservoirs avec décharge hypolimnique, l'eau provient d'une couche profonde et est plus froide en été et plus chaude en hiver que l'eau de la décharge non régulée au même emplacement, avant la formation du réservoir. En revanche, l'eau des réservoirs avec décharge épilimnique (qui sont généralement moins profonds) est plus chaude en aval à cause du réchauffement des eaux de surface. Par conséquent, ce type d'altération dans des régimes thermiques peut avoir des conséquences majeures sur le type et la complexité des communautés biologiques qui peuvent survivre en aval (Baxter, 1977; Baxter et Glaude, 1980).

Les variations des paramètres chimiques de la qualité de l'eau sont moins prévisibles étant donné la complexité des processus physiques, biologiques et chimiques interdépendants qui surviennent dans les réservoirs, tant durant la saison d'eau libre que pendant l'hiver, sous la glace. Ces modifications chimiques touchent notamment les concentrations et la dynamique des nutriments, le taux d'oxygène dans la colonne d'eau et les sédiments, la sursaturation en azote des eaux d'aval et la mobilisation accrue de certains métaux. En outre, dans les nouveaux réservoirs, la qualité de l'eau est souvent altérée par une forte poussée trophique due à des rejets de matériaux à partir du secteur récemment inondé, qui peuvent durer très peu de temps ou plusieurs années dans les grands réservoirs. L'un des effets les plus prévisibles des réservoirs sur la qualité de l'eau est le rejet de mercure contenu dans les sédiments immergés (Rosenberg et al., 1997). Le mercure sous sa forme méthylée pénètre dans la chaîne alimentaire et fait l'objet d'une bioconcentration, les concentrations les plus fortes étant mesurées chez les poissons et les oiseaux piscivores. Ces concentrations élevées dans les tissus peuvent souvent dépasser les niveaux établis dans les recommandations applicables à la consommation humaine (en particulier, chez les organismes du biote qui sont plus âgés), entraînant des risques pour la santé humaine et l'environnement.

Grâce notamment à la recherche de sources d'énergie « propres » entreprise en raison des changements climatiques, l'attention se tourne aussi vers le rôle du stockage de l'eau dans la variation de la production et de l'émission de gaz à effet de serre (GES). Contrairement à l'hypothèse largement répandue (p. ex., dans les scénarios établis par le GIEC ou Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) selon laquelle les quantités de GES s'échappant des réservoirs seraient négligeables, des mesures faites dans les régions boréale et tropicale indiquent qu'elles peuvent être considérables (St. Louis et al., 2000; World Commission on

Dams, 2000). Bien que le Canada tente de faire le point sur la situation actuelle au pays, il est difficile d'obtenir des données complètes sur les zones inondées (St. Louis et al., 2000) et l'on n'a pas encore de certitude quant à la précision des méthodes utilisées pour évaluer les émissions de gaz à partir de la surface des réservoirs (Rosa et dos Santos, 2000).

Réservoirs et écologie en aval

Les variations des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau des réservoirs influent inévitablement sur la répartition et l'abondance du biote aquatique et sur la structure de la communauté résultante. Dans les nouveaux réservoirs, les populations de poissons sont souvent assez nombreuses durant les premières années, en grande partie grâce à l'augmentation des nutriments qui sont lessivés par les végétaux et les sols inondés, à la productivité accrue tout au long de la chaîne alimentaire et de la disponibilité de sites sûrs pour la fraye et la protection contre les prédateurs (p. ex., Baxter et Glaude, 1980). Une fois le réservoir établi, ses nouvelles caractéristiques physico-chimiques peuvent poser différents problèmes pour le biote, surtout parce qu'elles ne sont pas synchrones avec les cycles naturels. La perturbation de la fraye due à la baisse ou à la hausse du niveau de l'eau, les variations des cycles saisonniers de température et les obstacles à la migration des poissons en sont quelques exemples majeurs. Pour une discussion plus détaillée sur les effets survenant à l'intérieur des réservoirs, prière de consulter Baxter et Glaude (1980) ainsi que Rosenberg et al. (1997).

De même, le biote en aval est exposé à un nouveau régime de perturbations (entre autres les altérations circadiennes et/ou saisonnières du régime thermique et du débit), le degré de perturbation étant lié à l'ampleur des changements survenus et à la distance avec le barrage en aval. Par exemple, les espèces de poissons lotiques choisissent leur habitat en fonction de la profondeur, de la vitesse d'écoulement de l'eau et du type de substrat. Si ces facteurs changent rapidement, comme ce serait le cas immédiatement en aval d'une centrale hydroélectrique en période de pointe, il est probable que ces poissons abandonneraient le secteur.

Intuitivement, les communautés biotiques devraient réagir de façon dynamique aux occasions qui se présentent dans leur environnement, mais le rôle des facteurs physiques et biotiques dans la structuration des écosystèmes aquatiques n'est pas toujours évident (Power et al., 1988; Rosenberg et al., 1997). Lorsque les caractéristiques physiques changent trop vite et à une fréquence imprévisible, il sera peut-être impossible de parvenir à un équilibre stable. En général, les communautés perturbées d'espèces colonisatrices tolérantes et d'espèces résidantes temporaires établies plus près des barrages sont remplacées par des communautés naturelles en aval à mesure que les conditions s'améliorent et que les échanges avec les tributaires et les eaux souterraines permettent au cours d'eau de revenir à son régime naturel (voir p. ex., Ward t Stanford, 1989; Curry et al., 1994).

Les barrages, conçus de façon à pouvoir répondre aux besoins quotidiens et hebdomadaires en énergie hydroélectriques, donnent lieu à des variations plus grandes des niveaux d'eau et des régimes hydrologiques que les grands réservoirs de stockage. Par conséquent, ils peuvent produire des effets perturbateurs plus grands sur les processus survenant dans le chenal et les zones riveraines et sur le biote (Nilsson et al., 1997; Jansson et al., 2000). Donc, la régulation du débit est souvent directement responsable d'une diminution de la diversité de l'habitat et de la biodiversité dans les tronçons situés en aval (Jansson, 2002). Bien que la plupart des réponses à la régulation du débit soient propres aux sites visés, on peut observer des profils généraux des effets à grande échelle en aval à l'échelle planétaire, et une synthèse de ces profils est en voie d'élaboration (p. ex., Dynesius et Nilsson, 1994; Nilsson et al., 1997; Rosenberg et al., 1997, 2000).

Tendances

Construction de barrages

La figure 1 illustre la croissance du nombre de grands barrages au Canada depuis le début du XX^{e} siècle jusqu'à nos jours. Avant les années 1940, la majorité des grands barrages construits l'ont été dans le sud de l'Ontario et le Québec. Depuis, de grands barrages ont été érigés dans tous les territoires et toutes provinces du pays. Aux États-Unis, la période la plus active de construction de barrages s'est déroulée entre 1950 et 1970, et a été appelée « l'âge d'or de la construction de barrages » (Doyle et al., 2003). On entend souvent le même commentaire relativement à la situation au Canada. Mais comme le montre la figure 1, au cours des années 1970, on a enregistré une intensité presque égale de construction de barrages que dans les années 1950. La période de pointe des années 1970 est surtout due à une activité intensive de construction de barrages à Terre-Neuve et dans le nord du Québec. Depuis les années 1970, la construction de barrages n'a cessé de ralentir, la grande majorité des nouveaux aménagements (c.-à-d. >70 %) se poursuivant au Québec. Toutefois, compte tenu du nombre de grands barrages présentement en construction et du nombre de projets d'agrandissement, par exemple, dans le nord du Québec (Holzinger, 1998; Hydro-Québec, 2002), au Manitoba (Lett et Samyn, 2003) et dans les Territoires du Nord-Ouest (Howatt, 2001), on peut vraiment se demander si la grande période de construction de gros barrages au Canada est chose du passé.

Bien que les cours d'eau du Nord renferment la plus grande partie du potentiel non exploité de production hydroélectrique à grande échelle du Canada, on observe aussi une tendance à la construction de petites cen-

trales hydroélectriques. De nombreuses petites centrales étaient en exploitation au début du XX^{e} siècle, mais les services publics d'électricité ont opté progressivement pour des centrales plus imposantes afin de réaliser des économies d'échelle. En fait, beaucoup de petites centrales ont été mises hors service après la Deuxième Guerre mondiale parce qu'il devenait peu à peu moins rentable de les entretenir et de les exploiter. Plus récemment, toutefois, à cause de l'envergure, des coûts et des impacts environnementaux négatifs des projets de grands barrages, les aménagements hydroélectriques ont été axés de plus en plus sur les projets de petites centrales, c.-à-d. celles de moins de 10 MW de puissance installée. Bon nombre de ces installations sont des centrales « au fil de l'eau ». Présentement, au Canada, il existe plus de 300 centrales ayant une puissance installée de 15 MW ou moins (Industrie Canada, 2003) et beaucoup d'autres qui sont à l'étude, en particulier dans les collectivités éloignées qui dépendent de l'électricité produite à fort coût par des centrales au diesel. Techniquement, environ 5 500 sites du Canada se prêteraient à la production d'hydroélectricité à petite échelle (Ressources naturelles Canada, 2000).

Sécurité des barrages

De toutes les situations pouvant survenir et mettant en cause des ouvrages de génie civil, les ruptures de barrages sont celles qui présentent les plus grands risques de dommages pour la vie humaine et les biens. Ces problèmes peuvent également entraîner la perte de réserves d'eau potable et d'eau d'irrigation, et la perte de capacité de production hydroélectrique. On n'a jamais réalisé de relevé historique des ruptures de barrages au Canada, mais heureusement, il n'y a jamais eu de grande rupture de barrages ayant entraîné des pertes de vies (Bechai et Christl, 2001). Cependant, il y a eu de nombreux incidents mettant en cause de petites structures de réservoir, souvent conçues dans le but d'atténuer les crues à courte période de récurrence (Watt, 1989). De plus, comme l'a mentionné la Commission mixte internationale au sujet de la sécurité des barrages transfrontaliers, certains s'inquiètent de l'absence d'un programme fédéral de sécurité des barrages et d'inspections gouvernementales régulières. La Commission note aussi que malgré l'influence exercée par les directives actuelles de l'Association des barrages du Canada sur les propriétaires de barrages et les gouvernements, il ne s'agit que de mesures d'application volontaire qui sont loin d'avoir le poids de véritables normes ou spécifications (Legault et al., 1998).

En général, trois types d'événements peuvent être à l'origine de la rupture de barrages : statiques, sismiques et hydrologiques – le débordement des eaux sur la face aval du barrage par suite de conditions extrêmes est le plus à craindre. Le débordement le plus grave survenu au Canada est associé à la crue exceptionnelle survenue en 1996 au Saguenay (Bechai et Christl, 2001). Pour éviter les bris de barrages imputables aux crues, la plupart des études sur la sécurité des barrages commencent par l'analyse hydrologique afin de pouvoir calculer la crue de conception (CMP : volume, hauteur maximale, durée, forme et facteur temps), communément définie comme étant l'inondation la plus grave pour laquelle un barrage et ses installations connexes sont conçus. Pour les grands barrages ou pour ceux dont la rupture peut causer des pertes économiques importantes ou des pertes de vies, la crue de conception est souvent définie comme étant la crue maximale probable (CMP) (Zielinski, 2001). Malheureusement, dans la plupart des cas, on n'a pas suffisamment de données pour définir précisément la probabilité de grandes crues et faire les estimations correspondantes. Ainsi, les estimations doivent aller au-delà de la période visée par les données existantes.

Les types de bris statiques qui sont particulièrement préoccupants comprennent l'érosion, l'augmentation de l'infiltration, les effets des glaces et, plus récemment, le terrorisme (voir p. ex., Martin, 2001). Les effets des glaces revêtent une importance particulière pour un pays au climat froid comme le Canada, notamment la façon dont les variations du niveau d'eau influent sur la poussée des glaces (Comfort et al., 2000). Les séismes peuvent avoir de graves impacts sur les barrages; certains petits barrages de construction ancienne ont été démolis parce qu'ils ne satisfaisaient pas aux normes techniques en vigueur. On sait également que la construction de barrages génère une activité sismique, la profondeur de l'eau étant le facteur le plus déterminant. Dans un cas bien documenté, une sismicité provoquée (magnitude de 4,3) s'est produite durant le remplissage du réservoir de Manicougan 3 en 1975 (Baxter et Glaude, 1980).

Le vieillissement général des barrages est un autre grand problème lié à la sécurité, plus particulièrement dans les régions où les aménagements effectués dans des bassins hydrographiques et l'urbanisation en aval des barrages ont amplifié les risques de pertes de vies et de dommages matériels. La figure 1 montre l'âge médian des grands barrages du Canada, qui s'établit présentement à 40 ans. D'après la vaste expérience des États-Unis en la matière, la durée de vie utile des barrages non entretenus est estimée en moyenne, selon une approche prudente, à 75 ans, ce qui contredit la fausse idée générale selon laquelle la durée de vie moyenne d'un barrage serait de 50 ans (Donnelly et al., 2002). Près de 80 % des barrages enlevés aux États-Unis l'ont été parce que l'on craignait pour la sécurité du barrage ou la capacité du déversoir, mais il y a une tendance qui se dessine axée sur l'enlèvement des barrages pour des raisons liées à l'environnement, comme on le verra dans l'analyse cidessous concernant la situation au Canada.

Impacts sur le biote en aval

Au cours des trois dernières décennies, les scientifiques ont déployé des efforts importants afin de mieux comprendre et prévoir les relations qui existent entre le débit des cours d'eau et le nombre et la qualité des habitats aquatiques. Collectivement, ces approches sont regroupées sous l'expression « normes de débit minimal » (NDM) (Bovee et al., 1998; Stalnaker et al., 1995). Pendant les années 1970, la détermination du débit minimal était axée principalement sur des méthodes visant à prédire le débit minimal qui doit être assuré pour soutenir l'écosystème aquatique en aval du barrage. Les approches mettaient souvent l'accent sur la maximisation des microhabitats pour un seul stade de développement d'une espèce de poisson ayant une grande importance (le plus souvent des salmonidés) à quelques emplacements isolés dans un réseau fluvial.

Ces méthodes ont généralement été mises au point pour être appliquées à de petits cours d'eau et réseaux fluviaux en se basant sur l'hypothèse selon laquelle si le débit minimal était assuré, les autres composantes de l'écosystème aquatique seraient protégées. Parmi les exemples de ces méthodes, on compte la méthode Tennant ou du Montana (Tennant, 1976) et la méthode du débit minimal écologique (Stalnaker et al., 1995). D'autres percées ont permis l'élaboration de la méthode du débit minimal incrémentiel (IFIM) et la mise au point de modèles simulant l'habitat physique (PHABSIM), qui sont des méthodes plus rigoureuses pour l'évaluation quantitative des effets du débit sur l'habitat du poisson.

L'application de ces approches nécessite une connaissance détaillée de l'habitat choisi par les espèces de poissons cibles que l'on doit protéger – généralement un poisson important pour la pêche sportive. En recueillant des données sur la profondeur, la vitesse du courant et le substrat où vit l'espèce cible, on peut établir des liens entre ses préférences quant à l'habitat et la qualité de ce dernier. On utilise ensuite la modélisation hydraulique couplée afin de produire des cartes détaillées des profondeurs, de la vitesse du courant et des substrats dans le cours d'eau et de délimiter les habitats utilisables par des espèces précises. En simulant différents débits, le modèle prédit le nombre d'espèces cibles susceptibles d'être présentes dans la zone modélisée et, par extrapolation, le nombre de poissons dans un tronçon plus long du cours d'eau.

La méthode IFIM est largement appliquée comme outil de prédiction des effets possibles des prélèvements d'eau et de la régulation du débit sur l'habitat aquatique, bien qu'elle soit de plus en plus critiquée (voir une discussion plus complète dans Armour et Taylor, 1991; Bovee et al., 1998; Mathur et al., 1985). Bien que les approches fondées sur la méthode IFIM soient complexes et que l'on doive user de prudence lorsqu'on en interprète les résultats, cette méthode continue d'évoluer et de se raffiner comme cadre ou système d'aide à la prise de décisions et elle permet d'examiner les impacts ou avantages possibles de la régulation du débit sur diverses composantes de l'écosystème aquatique, et les enjeux socio-économiques qui s'y rattachent (Bovee et al., 1998; Stalnaker et al., 1995; Walder, 1996).

Pour mettre au point des techniques applicables à de très grands cours d'eau du Canada, on a récemment expérimenté l'utilisation de la télédétection pour évaluer l'habitat dans des conditions d'écoulement variables (p. ex., Courtney et al., 1996), et on a tenté d'élargir la portée des évaluations afin d'inclure la totalité du biote aquatique et tous les facteurs pris en compte dans les hydrogrammes (p. ex., Milburn et al., 1999). Ces techniques n'en sont qu'au stade de la mise au point mais ce sont des outils nécessaires car la plupart des grands barrages ont une incidence sur de grands réseaux fluviaux. On trouvera un examen récent de l'état des connaissances sur la modélisation de l'habitat aquatique et des débits réservés écologiques dans Saint-Hilaire et Leclerc (2003).

Nouveaux enjeux

Désaffectation/démantèlement de barrages

Compte tenu de l'évolution des besoins sociaux dans les bassins hydrographiques aménagés et de la reconnaissance accrue du fait que les barrages altèrent la structure et le fonctionnement des écosystèmes fluviatiles, le démantèlement et la désaffectation de barrages suscitent de plus en plus d'intérêt (Babbit, 2002; Poff et Hart, 2002; Pohl, 2002). En règle générale, on a démantelé des barrages non pas parce qu'ils étaient défectueux mais parce que le coût de leur modernisation pour garantir leur sécurité était plus élevé que la valeur associée à la continuation de leur exploitation (Donnelly et al., 2002).

Il existe malgré tout une grande incertitude sur le plan social, économique et scientifique quant aux avantages environnementaux à court, à moyen et à long terme qui sont liés au démantèlement de barrages. On sait que les barrages altèrent les processus géomorphologiques et hydrologiques des secteurs riverains, mais on possède peu de données scientifiques sur les effets directs de leur enlèvement sur l'écoulement en aval, le profil du transport des sédiments et la morphologie générale du chenal (p. ex., Zhou et Donnelly, 2002a). Par ailleurs, l'aménagement en milieu rural et urbain ne cesse de s'intensifier dans les plaines d'inondation en aval, une situation qui vient compliquer davantage la question de l'enlèvement des barrages en apportant de nouvelles contraintes.

Les sédiments s'accumulent derrière les barrages pendant leur exploitation et il y a de forts risques qu'ils contiennent des concentrations élevées de certains contaminants chimiques (p. ex., métaux, hydrocarbures pétroliers et pesticides) (p. ex., Warren et Zimmerman, 1993). On possède peu de données sur les changements qui surviendront dans les concentrations, le devenir et la

répartition des contaminants dans les sédiments après le démantèlement de barrages et leur impact sur les communautés biologiques en aval, tant du point de vue spatial que temporel. De même, les barrages altèrent généralement le temps de séjour de l'eau, modifiant donc ses propriétés chimiques. Cependant, on ne sait pas encore avec certitude comment et dans quelle mesure l'enlèvement de barrages influera sur le rétablissement des processus biogéochimiques riverains à des conditions semblables à celles qui existaient avant la construction de barrages. Les barrages sont des obstacles physiques; par conséquent, ils neutralisent souvent les liens existant dans le réseau trophique « naturel » et les interactions entre les espèces dans les communautés riveraines (p. ex., les espèces ne peuvent pas se déplacer librement de part et d'autre du barrage). Les effets de l'enlèvement du barrage sur le rétablissement des communautés biologiques n'ont pas fait l'objet d'études suffisantes.

Changements climatiques

Comme le faisait remarquer la Commission mondiale des barrages (2000), il y a un consensus général selon lequel on ne peut plus supposer que le tableau d'avenir sera semblable à la situation vécue par le passé relativement à la conception et à l'entretien des barrages. On reconnaît de plus en plus que les changements climatiques auront vraisemblablement des impacts considérables sur la sécurité des barrages existants, qui ont été conçus en fonction des données météorologiques du passé. On a déjà effectué des études détaillées sur les effets que le maintien des tendances actuelles dans les conditions hydrologiques peut avoir sur les futures crues de conception (p. ex., Zhou et Donnelly, 2002b), mais les prévisions basées sur des scénarios climatologiques futurs modélisés grâce à des modèles de circulation générale (MCG ou modèles de climat du globe) restent encore à faire en grande partie. La plupart des prévisions de crues sont passablement nébuleuses et reposent sur des prédictions générales concernant les conditions futures de précipitations et de ruissellement, comme la probabilité d'une fonte printanière précoce ou la transition d'un régime nival (dominé par la fonte des neiges) à un régime pluvial (pluies) (IPCC, 2001). Il n'y a pas de quoi se surprendre étant donné la difficulté d'utiliser les MCG actuels pour fournir des estimations des précipitations à l'échelle régionale. À mesure que la qualité de ces prévisions se rehaussera et que des modèles climatiques régionaux (MCR) plus détaillés seront élaborés, on pourra mener des évaluations régionales des effets des changements climatiques sur certaines caractéristiques des crues – des données qui devraient par la suite être intégrées aux évaluations de la sécurité des barrages.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Dans l'ensemble, les menaces liées à la quantité d'eau des barrages, réservoirs et autres ouvrages de régulation du débit entrent dans trois grandes catégories.

- Menaces pesant sur le milieu aquatique créé par suite de l'aménagement de ces ouvrages
- Nouvelles menaces liées à leur démantèlement
- Menace posée par la variabilité et les changements climatiques

Le Canada doit enrichir ses connaissances pour être en mesure de réagir à toutes ces menaces, mais il doit d'abord mettre en œuvre un grand programme pour déterminer dans quelle mesure les réseaux hydrologiques sont aménagés et régulés. Ce programme fournirait notamment un point de départ qui permettra d'évaluer les impacts cumulatifs de la régulation du débit dans les écosystèmes dulcicoles, de prévoir les impacts futurs des changements climatiques et de quantifier les émissions de gaz à effet de serre. Le Canada a besoin d'un inventaire complet des barrages et des réservoirs en plus du relevé sommaire des grands barrages compilé par l'ACB ou par Dynesius et Nilsson (1994). De nombreuses provinces font le relevé des aménagements de petite envergure, qu'il faudra intégrer à l'inventaire de l'ACB. De plus, tous les inventaires du genre doivent inclure des données sur la superficie des réservoirs, une variable essentielle pour bien des évaluations scientifiques. Cette variable permettrait, par exemple, de calculer les pertes d'eau dues à une évaporation accrue de l'eau dans les réservoirs et son importance relativement à d'autres composantes du bilan hydrique – des données indispensables pour une planification et une gestion appropriées des ressources en eau des bassins hydrographiques.

Pour pouvoir évaluer la contribution relative des différents secteurs de l'énergie aux émissions de gaz à effet de serre (GES), le Canada doit terminer l'inventaire des émissions de GES par les réservoirs du pays. Plus précisément, les émissions de GES nettes doivent être calculées en fonction des conditions existant avant et après inondation. Compte tenu du manque de données à ce chapitre, les calculs devront probablement être basés sur les émissions provenant de secteurs inondés et de secteurs non inondés ayant un paysage similaire, et sur les estimations du bilan du carbone pour les bassins hydrographiques touchés.

À cause de leurs effets marqués sur le cycle hydrologique, les changements climatiques représentent une menace pour le réseau de barrages et de réservoirs existants. Pour atténuer ce danger, on doit mener des études plus poussées afin de définir de nouvelles valeurs pour la crue de conception qui pourront être

utilisées pour évaluer la sécurité des structures existantes et orienter la construction de futurs ouvrages. Il faut également quantifier les nouveaux régimes de glace et de débit en aval en fonction desquels les barrages seront exploités afin de réduire les risques d'inondations et de perturbations des écosystèmes aquatiques en aval. Les effets potentiels sur la sécurité des barrages résultant des changements climatiques suscitent également d'autres questions quant à la nécessité, dont il est souvent fait mention, de mettre sur pied un programme officiel d'inspection de la sécurité des barrages.

Bien que les effets de l'aménagement de réservoirs sur de l'eau stockée et sur les habitats aquatiques qui s'y trouvent soient relativement bien documentés, il existe encore des lacunes importantes dans la compréhension des effets en aval. Pour les petits barrages, on manque de données permettant d'alimenter les approches complexes de type « normes de débit minimal » (NDM) pour évaluer les impacts sur le biote. En outre, l'évaluation des impacts de la régulation du débit sur des cours d'eau de moyenne ou de grande taille n'en est qu'à un stade de développement rudimentaire. Étant donné que ces connaissances sont cruciales pour l'élaboration de stratégies appropriées de gestion des débits pour les cours d'eau régulés, on doit améliorer les approches de type NDM. La suite logique serait l'amélioration des techniques de télédétection, en particulier pour la quantification des paramètres des habitats essentiels. La mise au point d'outils de ce genre serait particulièrement utile pour l'évaluation des zones riveraines ou en eau peu profonde, où la productivité est généralement la plus élevée et aussi la plus sensible aux variations du débit.

Comme les effets de la régulation du débit n'ont pas fait l'objet d'études systématiques pendant plus de quelques décennies, il faut mettre en place un programme visant à poursuivre l'évaluation de ces changements sur une longue période dans les cours d'eau du Canada. En outre, pour évaluer les écarts de sensibilité à la régulation du débit, ce programme devrait inclure des sites soumis à différents régimes hydromorphologiques. De même, les effets de la régulation du débit sur l'état des glaces en aval ont fait l'objet de peu d'études, et seulement dans certains régimes hydroclimatiques. Le Canada devrait y porter une attention particulière, sachant que la plupart des cours d'eau sont couverts de glace pendant une bonne partie de l'année, et que la glace est une cause majeure d'événements hydrologiques extrêmes (faible débit et inondations) et un facteur de changement important des processus hydro-écologiques. On devrait également se pencher sur l'évaluation des effets à grande distance en aval et des impacts cumulatifs sur les réseaux fluviaux qui renferment de multiples barrages ou réservoirs.

Considérant l'âge des barrages ou réservoirs et les nouvelles exigences en vigueur au Canada à ce chapitre, il est probable que le démantèlement de barrages deviendra de plus en plus une option populaire – suivant une tendance déjà établie dans d'autres pays, en particulier aux États-Unis, où l'on s'efforce d'intégrer cette option dans les politiques et la prise de décisions (p. ex., The Aspen Institute, 2002). Pour mieux se positionner afin d'évaluer les coûts et les avantages du démantèlement des barrages, il est essentiel que les scientifiques du Canada aient une compréhension approfondie des méthodes de démantèlement des barrages et des effets qui peuvent s'appliquer au large éventail de types de cours d'eau dont le débit est régulé.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leur gratitude à M^me^ Chloe Faught et à M. Laurent de Rham, qui ont fouillé sans relâche pour trouver une grande partie des renseignements et des données de base contenus dans le présent rapport. Nous devons remercier également les divers organismes et leurs représentants qui nous ont fourni d'autres informations à jour concernant leurs activités et/ou leurs bases de données. Un grand merci aussi à A.T. Bielak, J.J. Gibson, M. Healey, R. Kallio et D.M. Rosenberg pour avoir révisé et commenté ces pages.

Références

Armour, C.L. et J.G. Taylor. 1991. « Evaluation of the instream flow incremental methodology by U.S. Fish and Wildlife Service Users ». Fisheries 16: 36-42.

Babbit, B. 2002. « What goes up, may come down ». BioScience 52(8): 656-658.

Baxter, R.M. 1977. « Environmental effects of dams and impoundments ». Ann. Rev. Ecol. Syst. 8: 255-283.

Baxter, R.M. et P. Glaude. 1980. « Environmental effects of dams and impoundments in Canada: experience and prospects ». Can. Bull. Fish. Aquat. Sci. 250. 34 p.

Bechai, M. et L. Christl. 2001. « Toward development of a comprehensive dam safety program in Ontario », p. 275-279. *Dans* « Proceedings, Canadian Dam Association Annual Conference », 30 septembre - 4 octobre 2001, Fredericton (N.-B.).

Bovee, K.D., B.L. Lamb, J.M. Bartholow, C.B. Stalnaker, J. Taylor et J. Henricksen. 1998. « Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology ». U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report, USGS/BRD-1998-004. viii. 131 p.

Calow, P. et G. Petts (s. la dir. de). 1994. « The rivers handbook. Hydrological and ecological principles ». Blackwell Scientific Publications, Londres. 526 p.

Canada-Saskatchewan. 1991. « Canada-Saskatchewan South Saskatchewan River Basin Study. Canada-Saskatchewan South Saskatchewan Basin Study Board, Final Report ». 87 p.

Canadian Dam Association. 2003. « Canadian dam register », mars, 2003.

Church, M. 1995. « Geomorphic response to river flow reg-

ulation: case studies and time-scales ». Regul. Rivers Res. Manage. 11: 3-22.

Comfort, G., Y. Gong et S. Singh. 2000. « Static ice loads for dam safety analysis », p. 8-17. *Dans* « Proceedings, Canadian Dam Association 2000 Annual Conference », Regina (Saskatchewan).

Courtney, R.F., C. Wrightson et G. Farrington. 1996. « A pilot study of the use of remote sensing to analyze fish habitat on the Peace River, July to October 1994 ». Northern Rivers Basin Study, Study Report No. 81, Alberta Environment, Edmonton, Canada.

Curry, R.A., J. Gehrels, D.L.G. Noakes et R. Swainson. 1994. « Effects of river flow fluctuations on groundwater discharge through brook trout, Salvelinus fontinalis, spawning and incubation habitats ». Hydrobiol. 277: 121-134.

den Hartog, G. et H.L. Ferguson. 1978. « Mean annual lake evaporation. Plate 17, Hydrological Atlas of Canada », Department of Fisheries and Environment, Ottawa.

Donnelly, C.R., N. Nalder, N. Paroschy et M. Philips. 2002. « Issues and controversies associated with dam removals ». Canadian Dam Association Bulletin 13(1): 7-18.

Doyle, M.W., E.H. Stanley, J.M. Harbor et G.S. Grant. 2003. « Dam removal in the United States: emerging needs for science and policy ». EOS, Transactions, American Geophysical Union 84(4): 29, 32-33.

Dynesius, M. et C. Nilsson. 1994. « Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world ». Science 266(4): 753-762.

Holzinger, T. 1998. « Hydro-Québec plans, Hydro-Québec proposed new dams on native lands ». Helio International, 4 May, 1998. Disponible à l'adresse Web http://www.helio-international.org/Helio/anglais/practices/dams.html. Site visité le 3 septembre 2003.

Howatt, T. 2001. « Hydro dams the future? NWT minister pitches revenue-making idea in Inuvik ». Northern News Service, 21 août 2001.

Hydro-Québec. 2002. « Eastmain-1 hydroelectric development ». Hydro-Québec Production, Bulletin No. 1, mis à jour en novembre 2002. 4 p.

ICOLD. 2003. « World Register of Dams 2003, computerized version ». International Commission on Large Dams, Paris.

Industrie Canada. 2003. Matériel et services d'énergie électrique; petite centrale hydroélectrique. Disponible à l'adresse Web http://strategis.ic.gc.ca/epic/internet/inmse-epe.nsf/vwGeneratedInterF/h_ep00020f.html. Site visité le 3 septembre 2003.

IPCC. 2001. « Climate change 2001, impacts, adaptation, and vulnerability ». *Dans* J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (s. la dir. de), « Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. 1032 p.

Jansson, R. 2002. « The biological cost of hydropower ». Coalition Clean Baltic, CCB Report No. 2002:2. 11 p.

Jansson, R., C. Nilsson, M. Dynesius et E. Andersson. 2000. « Effects of river regulation on river-margin vegetation: a comparison of eight boreal rivers ». Ecol. Appl. 10(1): 203-224.

Jolley, W. (Senior Dam Safety Officer, Land and Water British Columbia Inc., Victoria, Canada). Communication personnelle, 15 juillet 2002.

Lavallée, D. (Centre d'espertise hydrique du Québec, Service de la Sécurité des barrages, Gouvernement du Québec). Communication personnelle, 29 octobre 2002.

Legault, H.L., T.L. Baldini, P. Béland, S.B. Bayh, F. Murphy et A. Chamberlain. 1998. Des barrages sûrs? Un rapport de la CMI. Un rapport aux gouvernements du Canada et des Etats-Unis sur la sécurité des barrages et des digues soumis aux ordonnances de la Commission mixte internationale. Février 1998. Disponible à l'adresse Web http://www.ijc.org/comm/safedam/unsafe.html. Site visité le 3 septembre 2003.

Lett, D. et P. Samyn. 2003. « Dam nears final hurdle: feds kick in $300,000 for technical study of hydro mega-project ». Winnipeg Free Press, juin 19, 2003, Winnipeg (Man.), Canada.

Martin, T. 2001. « Pearl Harbor – lessons for the dam safety community », p. 285-294. *Dans* « Proceedings, Canadian Dam Association Annual Conference », 30 septembre - 4 octobre 2001, Fredericton (N.-B.).

Mathur, D., W.H. Bason, E.J. Purdy Jr. et C.A. Silver. 1985. « A critique of the Instream Flow Increment Methodology ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42: 825-831.

Milburn, D., D.D. MacDonald, T.D. Prowse et J.M. Culp. 1999. « Ecosystem Maintenance Indicators for the Slave River Delta, Northwest Territories », p. 329-348. *Dans* Y.A. Pykh, D.E. Hyatt et R.J.M. Lenz (s. la dir. de), « Environmental indices, systems analysis approach ». EOLSS Publishers Co. Ltd., Oxford, Royaume-Uni.

Neu, H.J.A. 1982a. « Man-made storage of water resources-a liability to the ocean environment? Part I ». Mar. Pollut. Bull. 13: 7-12.

Neu, H.J.A. 1982b. « Man-made storage of water resources-a liability to the ocean environment? Part II ». Mar. Pollut. Bull. 13: 44-47.

Nilsson, C., R. Jansson et U. Zinko. 1997. « Long-term responses of river-margin vegetation to water-level regulation ». Science 276: 798-800.

Petts, G.E. 1984. « Impounded rivers: perspectives for ecological management ». Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, Chichester. 326 p.

Poff, N.L. et D.D. Hart. 2002. « How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal ». Bioscience 52(8): 659-668.

Pohl, M.M. 2002. « Bringing down our dams: trends in American dam removal rationales ». J. Amer. Water Resour. Assoc. 38(6): 1511-1519.

Power, M.E., R.J. Stout, C.E. Cushing, P.P. Harper, F.R. Hauer, W.J. Matthews, P.B. Moyle, B. Statzner et I.R. Wais de Badgen. 1988. « Biotic and abiotic controls in river and stream communities ». J. N. Amer. Benthol. Soc. 7: 456-479.

Prowse, T.D. 1994. « The environmental significance of ice to cold-regions streamflow ». Freshwater Biol. 32(2): 241-260.

Prowse, T.D. 2001a. « River-ice ecology: part A) hydrologic, geomorphic and water-quality aspects ». J. Cold Regions Eng. 15(1): 1-16.

Prowse, T.D. 2001b. « River-ice ecology: part B) biological aspects ». J. Cold Regions Eng. 15(1): 17-33.

Prowse, T.D. et M. Conly. 1996. « Impact of flow regulation on the aquatic ecosystem of the Peace and Slave Rivers ». Northern Rivers Basin Study, Edmonton, Canada, Synthesis Report No. 1. 168 p.

Ressources naturelles Canada. 2000. Évaluation des ressources hydroélectriques. Disponible à l'adresse Web http://www.canren.gc.ca/resou_asse/index_f.asp?CaId=54&PgId=307. Site visité le 3 septembre 2003.

Rosa, L.P. et M.A. dos Santos. 2000. « Certainty and uncertainty in the science of greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs, Part II. World Commission on Dams Thematic Review », Environmental Issues II.2., Secretariat of the World Commission on Dams, Cape Town, Afrique du Sud.

Rosenberg, D.M., F. Berkes, R.A. Bodaly, R.E. Hecky, C.A. Kelly et J.W.M. Rudd. 1997. « Large-scale impacts of hydroelectric development ». Environ. Rev. 5: 27-54.

Rosenberg, D.M., P. McCully et C.M. Pringle. 2000. « Global-scale environmental effects of hydrological alterations: introduction ». Bioscience 50(9): 746-751.

Stalnaker, C., B.L. Lamb, J. Henricksen, K. Bovee et J. Bartholow. 1995. « The instream flow incremental methodology – a primer for IFIM ». National Biological Service, U.S. Department of the Interior Biological Report 29, Washington, DC. 49 p.

St. Hilaire, A. et M. Leclerc (s. la dir. de). 2003. « State-of-the-art in habitat modelling and conservation flows ». Special Issue Can. Water Resour. J. 28(2): 133-336.

St. Louis, V.L., C.A. Kelly, E. Duchemin, J.W.M. Rudd et D.M. Rosenberg. 2000. « Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate ». BioScience 50(9): 766-775.

The Aspen Institute. 2002. « Dam removal, a new option for a new century ». The Aspen Institute Program on Energy, the Environment, and the Economy. Queenstown, Md., États-Unis. 68 p.

Tennant, D.L. 1976. « Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources ». Fisheries 1(4): 6-10.

Walder, G.L. 1996. « Proceedings of the Northern River Basins Study Instream Flow Needs Workshop, 14-15 October 1993 and 6-7 January 1994 ». Northern River Basins Study Report No. 66, Alberta Environment, Edmonton, Canada.

Ward, J.V. et J.A. Stanford. 1989. « The intermediate disturbance hypothesis: an explanation for biotic diversity patterns in lotic systems », p. 347-356. *Dans* T.D. Fontaine et S.M. Baretell (s. la dir. de), « Dynamics of lotic ecosystems ». Ann Arbor Science. Ann Arbor, U.S.A.

Warren, L.A. et A.P. Zimmerman. 1993. « Trace metal-suspended particulate matter associations in a fluvial system: physical and chemical influences », p. 127-155. *Dans* S. Rao (s. la dir. de), « Particulate and matter and aquatic contaminants ». Lewis Publishers, Boca Raton.

Watt, W.E. (s. la dir. de). 1989. *Hydrologie des crues au Canada : Guide de planification et de conception*. Conseil national de recherches du Canada, NRCC No 29734. 245 p.

Wells, P.G. 1999. « Environmental impacts of barriers on rivers entering the Bay of Fundy: report of an ad-hoc Environment Canada Working Group ». Technical Report Series No. 334. Service canadien de la faune.

World Commission on Dams. 2000. « Introduction to Global Change, Working Paper of the World Commission on Dams, Secretariat of the World Commission on Dams », Cape Town, Afrique du Sud.

Zhou, R.D. et C.R. Donnelly. 2002a. « The impact of dam removal on instream sediments ». *Dans* « Proceedings, Canadian Dam Association Annual Conference », 7-9 octobre 2002, Victoria (C.-B.).

Zhou, R.D. et C.R. Donnelly. 2002b. « Evaluating the impact of climate change on dam safety ». *Dans* « Proceedings, Canadian Dam Association Annual Conference », 7-9 octobre 2002, Victoria (C.-B.).

Zielinski, P.A. 2001. « Flood frequency analysis in dam safety assessment », p. 79-86. *Dans* « Proceedings, Canadian Dam Association Annual Conference », 30 septembre - 4 octobre 2001, Fredericton (N.-B.).

Chapitre 3

SÉCHERESSES

Barrie Bonsal[1], Grace Koshida[2], E.G. (Ted) O'Brien[3] et Elaine Wheaton[4]

[1] Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Saskatoon (Sask.)

[2] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Groupe de recherche sur les impacts et l'adaptation, Toronto (Ont.)

[3] Agriculture et Agroalimentaire Canada, ARAP, Regina (Sask.)

[4] Conseil de recherche de la Saskatchewan, Saskatoon (Sask.)

Situation actuelle

Comme la santé des écosystèmes et la plupart des activités humaines dépendent d'approvisionnements en eau fiables et adéquats, les sécheresses représentent une menace nationale sérieuse pour le Canada. Les sécheresses de grande étendue ont des effets majeurs sur un vaste éventail de secteurs pour lesquels l'eau joue un rôle important, notamment l'agriculture, l'industrie, les municipalités et les loisirs, de même que sur les écosystèmes aquatiques. Les sécheresses affectent souvent les approvisionnements en eau en épuisant les réserves d'eau des sols, en réduisant les débits des cours d'eau, en abaissant les niveaux des lacs et des réservoirs et en diminuant les réserves d'eaux souterraines. Or, de tels effets se répercutent sur plusieurs activités économiques : diminution de la production agricole et de la production d'énergie hydroélectrique, augmentation des coûts du transport maritime, etc. En outre, les sécheresses ont d'importantes conséquences environnementales : réduction de la qualité de l'eau, perte de milieux humides, érosion et dégradation des sols, destruction d'habitats, pour n'en nommer que quelques-unes.

Les sécheresses sont des phénomènes complexes pour lesquels il n'existe aucune définition précise. En gros, on peut définir une sécheresse comme une période prolongée de temps anormalement sec qui épuise les ressources en eau nécessaires à l'humain et à l'environnement (Groupe d'étude des sécheresses du SEA, 1986). Cependant, chaque sécheresse est différente par la durée, l'intensité, les conditions antérieures de la région affectée et sa capacité de s'adapter aux pénuries d'eau. Les sécheresses se distinguent également des autres menaces (p. ex., les inondations) en ce sens qu'elles durent longtemps et que leur début et leur fin sont difficiles à établir. Qui plus est, leur répétition dans les régions sujettes à de tels phénomènes est pratiquement certaine, puisqu'elles caractérisent les milieux secs (Maybank et al., 1995). Les sécheresses se produisent à diverses échelles temporelles et spatiales, et leurs effets sont fonction du moment où elles surviennent et de la séquence de périodes sèches qui se sont succédé. Par exemple, un manque d'eau et d'humidité du sol à un moment critique de la croissance des cultures peut déclencher une sécheresse qui affectera l'agriculture, mais la production d'hydroélectricité peut ne pas être affectée si les réservoirs sont suffisamment remplis. Des anomalies climatiques perdurant de un mois à des années sont à l'origine de la plupart des sécheresses; cependant, les effets de l'activité humaine sur les ressources et le climat ainsi que les changements touchant la demande en eau sont également d'importants facteurs qui contribuent à l'apparition de sécheresses (McKay et al., 1989).

Sécheresses au Canada

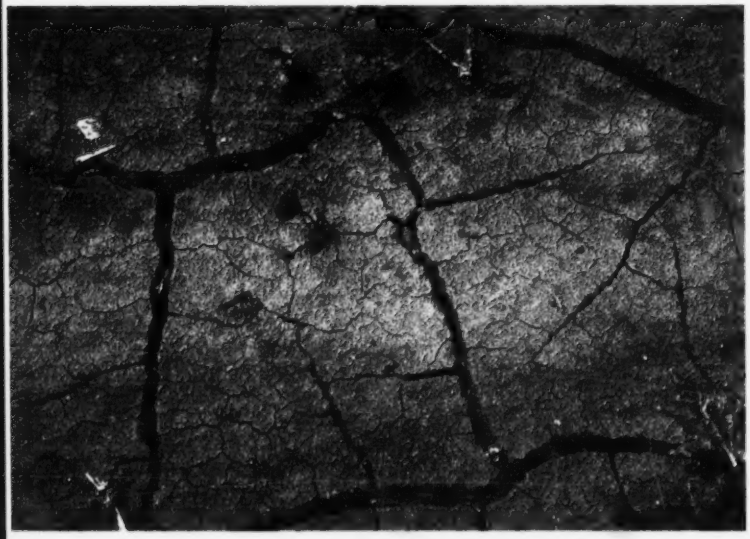
Bien que la plupart des régions du Canada aient connu la sécheresse, les Prairies (et, à un degré moindre, les régions de l'intérieur de la Colombie-Britannique) sont plus vulnérables en raison de la variabilité élevée des précipitations sur les plans temporel et spatial. Au cours des deux derniers siècles, au moins 40 sécheresses de longue durée ont touché l'Ouest canadien. Dans les régions du sud de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Manitoba, on a observé des sécheresses se prolongeant sur plusieurs années dans les années 1890, 1930 et 1980 (Phillips, 1990; Wheaton, 2000). Dans l'est du Canada, les sécheresses sont habituellement moins longues, frappent de moins grandes étendues et sont moins fréquentes et moins intenses; néanmoins, quelques grandes sécheresses s'y sont produites au cours du 20e siècle. En 1963-1964, par exemple, plusieurs puits du sud de l'Ontario se sont taris, ce qui a nécessité le transport d'eau d'autres régions. Les Grands Lacs ont également connu des bas niveaux extrêmes, lesquels ont occasionné des pertes considérables pour l'industrie du transport maritime (Gabriel et Kreutzwiser, 1993; Brotton, 1995). Les provinces de l'Atlantique connaissent la sécheresse encore moins fréquemment. Toutefois, une occurrence réduite se traduit par une capacité d'adaptation inférieure, ce qui rend cette région plus vulnérable aux effets de la sécheresse (ministère de l'Agriculture et des Pêches de la Nouvelle-Écosse, 2001). Les sécheresses sont un phénomène

moins préoccupant pour les régions du Nord canadien, notamment en raison de leurs plus faibles densités de population; néanmoins, l'accroissement de la fréquence des feux de forêt pendant les années de sécheresse peut avoir de graves conséquences économiques.

La sécheresse de 2001-2002 était exceptionnelle en raison de sa grande étendue spatiale. Des conditions de sécheresse intense ont frappé la majeure partie du sud du Canada, depuis la Colombie-Britannique jusqu'aux provinces de l'Atlantique, en passant par les Prairies, les Grands Lacs et la région du Saint-Laurent. Dans une grande partie des Prairies, plusieurs saisons consécutives de précipitations inférieures à la moyenne ont provoqué l'une des sécheresses les plus graves jamais enregistrées, dévastant de nombreuses ressources liées à l'eau en 2001 et en 2002. En 2001, le niveau global des Grands Lacs a atteint son point le plus bas en plus de 30 ans, les lacs Supérieur et Huron enregistrant des bas niveaux quasi historiques (Mitchell, 2002). Au Canada atlantique, trois années consécutives de sécheresse ont forcé la Nouvelle-Écosse à demander conseil à l'Administration du rétablissement agricole des Prairies (ARAP) au sujet de méthodes pour augmenter l'approvisionnement en eau des communautés agricoles.

Causes

Les sécheresses sont le résultat de perturbations dans un modèle de précipitation prévu et peuvent être intensifiées par les températures anormalement élevées qui accentuent l'évaporation. La cause principale du début et de la perpétuation d'une sécheresse est imputable aux régimes de circulation de l'air dans la haute atmosphère. Au Canada, les sécheresses estivales les plus extrêmes sont associées à la présence en haute altitude d'une crête barométrique persistante d'amplitude élevée au-dessus de la région touchée. Ce régime de circulation engendre des conditions qui déplacent le courant-jet, les trajectoires cycloniques ainsi que les masses et les fronts d'air humide (Chakravarti, 1976; Dey, 1982; Groupe d'étude des sécheresses du SEA, 1986). Les sécheresses peuvent également débuter et/ou se poursuivre pendant la saison froide lorsqu'un manque de précipitations provoque un ruissellement moins important qu'à l'habitude au printemps et, par conséquent, une réduction du débit des cours d'eau ainsi que du réapprovisionnement en eau des réservoirs et des sols. Ces insuffisances de précipitations sont également provoquées par des régimes de circulation anormaux dans les hautes couches de l'atmosphère et, en particulier, par un fractionnement du courant-jet au-dessus de l'Amérique du Nord (p. ex., Shabbar et al., 1997).



Les sécheresses font peser une grave menace sur les réserves d'eau au Canada. Elles ont donc des effets sur un grand nombre de secteurs d'activité et de composantes de l'environnement qui dépendent de l'eau, dont l'agriculture, les municipalités, les loisirs et les écosystèmes aquatiques.

Plusieurs études ont établi des rapports entre les températures à la surface de la mer dans diverses régions du globe et les régimes atmosphériques à grande échelle qui entraînent des anomalies de température et de précipitations au Canada. Ainsi, on a relevé des rapports significatifs entre le phénomène El Niño-oscillation australe, d'une part, et les régimes de température et de précipitations de l'hiver et du début du printemps, d'autre part, dans plusieurs régions du pays.(Shabbar et Khandekar, 1996; Shabbar et al., 1997). On a également relevé des rapports entre les températures à la surface de la mer dans le nord du Pacifique, d'une part, et la formation de crêtes atmosphériques au-dessus des Prairies menant à des sécheresses plus intenses pendant la saison de croissance des cultures, d'autre part (Bonsal et al., 1993; Bonsal et Lawford, 1999). Cependant, ces rapports estivaux sont beaucoup moins robustes que ceux constatés en hiver. Les rapports entre les régimes de température et de précipitations du Canada et d'autres oscillations à grande échelle telles que l'oscillation décennale du Pacifique (PDO) et l'oscillation nord-atlantique (NAO) sont également évidents pendant l'hiver (p. ex., Bonsal et al., 2001a). Les sécheresses tendent à persister du fait que les printemps chauds et secs sont suivis d'étés également chauds et secs. En outre, il semble y avoir une tendance voulant que les étés chauds soient suivis par d'autres étés chauds, et ainsi de suite. Il est difficile d'expliquer ces tendances, mais on peut probablement avancer qu'elles sont liées aux processus de rétroaction qui accentuent ou prolongent les conditions de sécheresse (p. ex. humidité des sols anormale) (Maybank et al., 1995).

Surveillance, modélisation et prévision

On utilise présentement des rapports en temps réel sur les niveaux des lacs et des réservoirs, les débits des cours d'eau, les accumulations nivales, les volumes

d'approvisionnement en eau prévus, les niveaux des mares artificielles (pour les Prairies) et les anomalies de précipitations pour assurer la surveillance des conditions de sécheresse au Canada. L'état des réserves d'eau mentionnées ci-dessus est critique pour des activités telles que l'irrigation, la répartition de l'eau, le stockage de l'eau, les prévisions concernant les inondations, la production d'énergie hydroélectrique, la navigation et la pêche ainsi que pour les habitats en milieu humide. Dans les Prairies canadiennes, les organismes provinciaux responsables des ressources en eau publient des rapports mensuels sur le niveau des cours d'eau, des lacs, des réservoirs et des eaux souterraines depuis la fin des années 1970. L'état des pâturages, les approvisionnements en eau de surface à la ferme et les précipitations saisonnières totales sont enregistrés par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). AAC assure la tenue du site Web *Guetter la sécheresse* qui fournit de l'information en temps réel sur l'état de sécheresse des Prairies et fait la promotion de pratiques visant à réduire la vulnérabilité à la sécheresse. La sécheresse pancanadienne de 2001 est à l'origine de l'ajout, à ce site, de fonctions de suivi du risque et des conditions de sécheresse dans les principales régions agricoles du pays. On procède présentement, en collaboration avec le Service météorologique du Canada (SMC), à l'élaboration d'une carte nationale illustrant les précipitations totales.

De nombreux indices (mesures de la gravité de la sécheresse) sont également employés pour surveiller et modéliser les conditions de sécheresse. Ces indices peuvent être simples (ne considèrent que les précipitations) ou plus complexes via l'incorporation d'une approche axée sur l'équilibre hydrique utilisant les précipitations, l'évapotranspiration potentielle, l'humidité antérieure du sol et le ruissellement (p.ex., l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer [PDSI]; Palmer, 1965). Divers indices de l'humidité des sols ont également été employés pour surveiller et modéliser la variation de l'humidité des sols en fonction des précipitations quotidiennes et de l'évapotranspiration réelle. L'un des problèmes rencontrés avec ces index plus complexes est qu'il est difficile de calculer l'évapotranspiration puisqu'elle est fondée sur des mesures météorologiques qui, en général, ne sont pas faciles à obtenir (rayonnement net, déficit de pression de vapeur, vitesse des vents). La variabilité spatiale élevée des précipitations convectives d'été et les difficultés à modéliser les eaux de fonte de la neige et la chasse-neige élevée constituent également des obstacles à la modélisation de l'humidité à l'échelle régionale (Maybank et al., 1995). Actuellement, plusieurs indices météorologiques et des eaux de surface sont à l'étude et/ou pris en considération pour une application à l'échelle du Canada. On planifie également l'intégration de ces indices pour surveiller les conditions de sécheresse en temps quasi réel dans le pays en entier, un peu comme c'est le cas avec le projet de surveillance de la sécheresse aux États-Unis (Drought Monitor) (Svoboda et al., 2002). Des mesures prises par satellite et par radar pourraient fournir des solutions aux problèmes d'échelle spatiale liés à la surveillance et à la modélisation des sécheresses. Le SMC utilise actuellement le capteur hyperfréquences spécialisé/imageur (SSMI) pour produire des cartes de l'équivalent en eau de la neige pour les provinces des Prairies que pourront utiliser les organismes responsables des ressources en eau.

La prévision des sécheresses nécessite la prévision des anomalies climatiques qui produisent des conditions exceptionnellement sèches pendant une période prolongée; cependant, à l'heure actuelle, aucune méthode entièrement satisfaisante ne peut prévoir de façon régulière le climat canadien pour un mois ou une saison, données dont on a besoin pour l'analyse des sécheresses. Environnement Canada produit actuellement des prévisions saisonnières pour la température et les précipitations et ce, pour des périodes de 3, 6, 9 et 12 mois, en utilisant des techniques de modélisation statistiques et numériques. Les prévisions sont mises à jour à tous les trimestres à l'échelle nationale, mais c'est souvent une fréquence trop faible pour les analyses régionales et locales de la sécheresse.

Adaptation

L'adaptation requiert un ajustement en fonction des changements, des variations et des extrêmes climatiques pour éviter ou atténuer les effets négatifs de situations données et tirer profit des occasions qui se présentent (Watson et al., 2001). L'adaptation à la sécheresse comprend la prise de mesures à court et à long terme ainsi que la mise en oeuvre de programmes et de politiques pendant et avant la sécheresse qui contribueront à réduire le risque pour la vie humaine, les propriétés et la capacité de production (Wilhite, 2000). Les Canadiens ont beaucoup d'expérience en matière d'adaptation aux sécheresses; cependant, leurs stratégies d'adaptation varient selon le secteur et l'endroit. Les régions présentant un plus grand risque de sécheresse sont souvent mieux préparées. Les décisions relatives aux mesures d'adaptation à la sécheresse sont prises à divers niveaux (individus, groupes et établissements, pouvoirs publics locaux et nationaux, etc.). Divers processus ou stratégies d'adaptation existent, dont le partage ou la prise en charge des pertes, la modification des effets de la sécheresse, la recherche, l'éducation, le changement de comportement et l'évitement (Burton et al., 1993). Les mesures d'adaptation à la sécheresse incluent la conservation de l'eau et des sols, l'amélioration de l'irrigation et la construction d'infrastructures, y compris des puits, des canalisations, des mares artificielles et des réservoirs ainsi que l'exploration de sources d'eau souterraines. L'utilité de chaque ensemble de stratégies varie selon l'emplacement, le secteur ainsi que la nature et le

moment de la sécheresse. L'intervention sera meilleure si l'on assure une surveillance améliorée de la sécheresse et des effets de celle-ci et si l'on mène des prévisions plus poussées. Les ajustements apportés après la sécheresse sont généralement moins efficaces qu'une adaptation planifiée au préalable.

Les recherches et les stratégies de planification en matière d'adaptation à la sécheresse en sont à leurs débuts, bien que des plans de gestion des risques pour les régions du pays sujettes à la sécheresse aient été établis (p. ex., le Plan de gestion des risques de sécheresse en agriculture de l'Alberta). Beaucoup de stratégies d'adaptation pour réduire les effets de la sécheresse ont été conçues et leur efficacité mise à l'essai (Maybank et al., 1995). Cependant, les sécheresses intenses de grande étendue qui persistent pendant plusieurs années entraînent toujours de graves difficultés, même dans les régions où on a l'habitude de ces situations. Il faut donc améliorer notre capacité à prévoir les nombreux effets des sécheresses si l'on veut améliorer notre adaptation. En outre, il faudra une planification coordonnée et proactive améliorée face aux sécheresses aux paliers

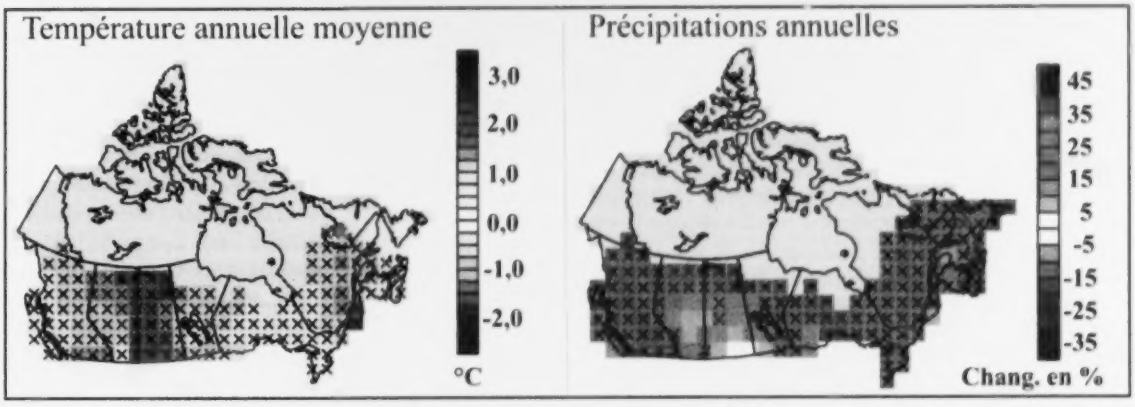


Figure 1. Tendances des températures annuelles moyennes (°C/99 ans) et des précipitations annuelles totales (% de changement/99 ans) dans le sud du Canada de 1900 à 1998. Les carrés de la grille correspondant à des tendances statistiquement significatives (5 %) sont marqués par des croix (tiré de Zhang et al., 2000).

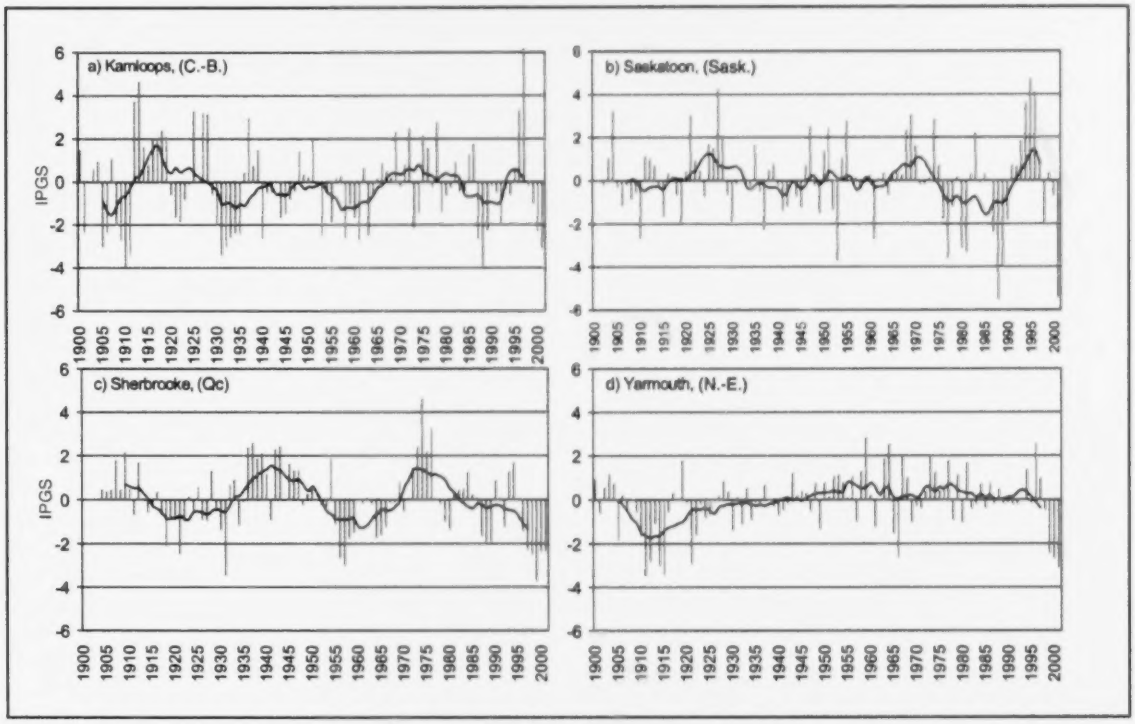


Figure 2. Valeurs annuelles du PDSI pour a) Kamloops, C.-B., b) Saskatoon, Sask., c) Sherbrooke, Qc et d) Yarmouth, N.-É. Les lignes continues correspondent à des moyennes mobiles sur dix ans (source : Direction de la recherche climatologique, Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Downsview, Ont.).

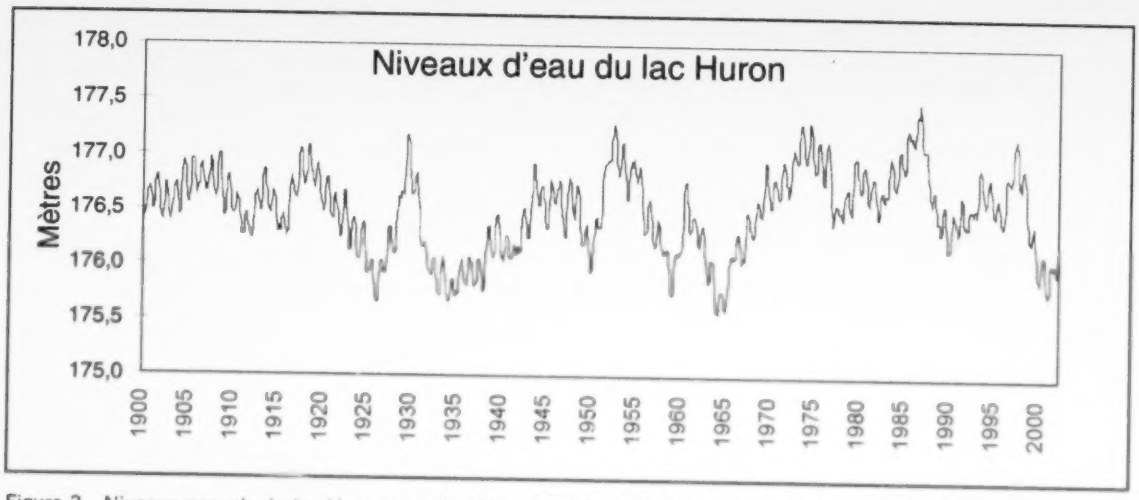


Figure 3. Niveaux annuels du lac Huron pour la période de 1900 à 2001 (source : Environnement Canada, Division des questions hydrologiques, Burlington, Ont.).

municipal, provincial et national, puisque notre vulnérabilité à de futures sécheresses pourrait être aggravée par la poursuite du développement ainsi que par le plus grand assèchement estival et le risque de sécheresse accru qui menacent la plupart des zones continentales des latitudes tempérées en raison des changements climatiques (Watson et al., 2001).

Tendances et variabilité

On a consenti des efforts pour définir les tendances et la variabilité à grande échelle des températures et des précipitations au Canada et, à un moindre degré, divers indices de sécheresse pendant la période des relevés instrumentaux. En ce qui concerne ces relevés, les résultats montrent en général une variabilité considérable à l'échelle des décennies, sans tendances constantes sur les plans de la fréquence, de la durée ou de la gravité des sécheresses au cours du 20^{e} siècle. Un des problèmes inhérents à la plupart de ces analyses des tendances est qu'elles ont été effectuées indépendamment les unes des autres et que peu de tentatives ont été faites pour dériver des résultats globaux pour l'ensemble du pays. En outre, elles diffèrent souvent sur le plan des dates de début du calcul des tendances et des conditions initiales pour établir les indices de sécheresse. Qui plus est, les limites des relevés instrumentaux (les 100 dernières années), combinées à de rares données paléoclimatiques haute résolution sur les régions les plus sujettes à la sécheresse, compliquent considérablement l'établissement des tendances à long terme des sécheresses au Canada. Voici des exemples de tendances et de la variabilité de divers paramètres associés aux sécheresses.

Des températures de surface élevées peuvent intensifier les conditions de sécheresse en provoquant une évaporation accrue pendant l'été de même qu'une sublimation et une fonte plus importantes de la couverture nivale en hiver. Plusieurs études ont démontré des tendances significatives concernant les températures et divers indices connexes au Canada au cours du 20^{e} siècle. La température annuelle moyenne de l'air a augmenté de 0,9 °C en moyenne dans le sud du Canada de 1900 à 1998 (figure 1). Le réchauffement le plus important a été observé dans l'Ouest, et les plus grandes augmentations se sont produites pendant l'hiver et particulièrement au printemps (Zhang et al., 2000). Une grande partie du pays a également affiché des tendances significatives vers de plus longues périodes sans gel (Bonsal et al., 2001b). Une telle situation pourrait avoir une incidence sur la fréquence des sécheresses, puisque ces tendances se traduisent par une plus longue période d'eaux libres pour les lacs et les cours d'eau, d'où une augmentation du potentiel d'évaporation. De 1900 à 1998, les précipitations annuelles ont augmenté sensiblement dans la majeure partie du sud du Canada, sauf dans le sud de l'Alberta et de la Saskatchewan (figure 1). En général, ce régime est également évident au cours de toutes les saisons (Zhang et al., 2000). En Amérique du Nord, la période de 1915 à 1997 a été associée à une variabilité interdécennale considérable de la couverture nivale (couvertures de neige les moins importantes dans les années 1920 et 1930 et les plus importantes à la fin des années 1970 et au début des années 1980). Coïncidant avec de fortes augmentations des températures printanières, les années 1980 et 1990 ont été caractérisés par des réductions rapides de la couverture nivale pendant la deuxième moitié de l'hiver, particulièrement en avril (Brown, 2000).

La figure 2 donne des exemples de la série chronologique du PDSI pour le 20^{e} siècle pour différentes régions du pays (Skinner, 2002). Un PDSI négatif représente des conditions de sécheresse. La série montre une variabilité considérable à l'échelle décennale, sans tendance à long terme perceptible dans quelque région du pays que ce soit. Les quatre graphiques illustrent cependant des conditions de sécheresse observées dans la majeure partie

du Canada à la fin des années 1990 et au début des années 2000. Sauchyn et Skinner (2001) ont reconstitué le PDSI de juillet pour les plaines du sud-ouest du Canada en étudiant des anneaux de croissance d'arbres remontant jusqu'à 1597. Les résultats démontrent que le 20e siècle n'a pas connu de sécheresses prolongées comme les 18e et 19e siècles, où le PDSI s'est maintenu en dessous de zéro pendant des décennies complètes. Les blocs d'années de sécheresse dans la série semblent indiquer l'existence d'une périodicité de 20 à 25 ans dans cette région.

Pour ce qui est de la circulation à grande échelle, Skinner et al. (1999) indiquent une tendance à la hausse des hauteurs au niveau de 500 hPa dans la majeure partie du Canada, avec une amplification de la crête de l'Ouest canadien et un déplacement vers l'est du creux barométrique polaire canadien pour la période 1953-1995. Nombre d'oscillations atmosphériques et océaniques à grande échelle, telles que le PDO et le NAO, indiquent généralement une variabilité interannuelle et interdécennale considérable au cours du siècle dernier. Le phénomène El Niño, cependant, a eu tendance à être plus fréquent et plus intense pendant les 20 à 30 dernières années, et certains modèle projettent davantage de conditions semblables à celle provoquées par El Niño (p. ex., Timmermann et al., 1999). Cela pourrait avoir une incidence sur les conditions de sécheresse en hiver puisque El Niño a été associé à des hivers plus secs et plus chauds dans la majeure partie du sud du Canada (Shabbar et Khandekar, 1996; Shabbar et al., 1997).

Quelques analyses des tendances et de la variabilité de divers indicateurs de sécheresse liés à l'eau ont été réalisées au Canada, mais ces relevés ont tendance à s'étendre sur des périodes beaucoup plus courtes. Au cours des 30 à 50 dernières années, le débit moyen des cours d'eau a diminué dans de nombreuses régions du Canada, et des réductions significatives ont été constatées dans le sud du pays (Zhang et al., 2001). Les niveaux d'eau des Grands Lacs ont affiché une variation considérable au cours du 20e siècle. Ainsi, la figure 3 indique plusieurs périodicités à l'échelle décennale pour les niveaux du lac Huron sans toutefois donner d'indices d'une tendance à long terme. Les niveaux les plus bas ont coïncidé avec les sécheresses des années 1930, du début des années 1960 et de 1999 à 2001, la plus récente. Dans les Prairies, le nombre de milieux humides et leurs niveaux d'eau n'ont révélé aucune tendance claire au cours des 40 à 50 dernières années (Conly et van der Kamp, 2001).

L'ensemble des modèles climatiques mondiaux laissent prévoir une augmentation de l'assèchement des zones situées à l'intérieur du continent en été et un risque de sécheresse connexe. Le risque de sécheresse accru est attribué à une combinaison de l'accroissement des températures et de l'évaporation potentielle non compensée par des précipitations (Watson et al., 2001). Cependant, une incertitude considérable existe en ce qui concerne les précipitations futures, en particulier à l'échelle régionale et intrasaisonnière. Qui plus est, on sait relativement peu de choses sur les changements liés aux régimes de circulation de l'air à grande échelle et, puisque ces régimes ont un effet significatif sur les températures et les précipitations au Canada, l'occurrence de sécheresses futures demeure un domaine où il reste encore beaucoup à découvrir.

Manques de connaissances et besoins en matière de programmes

Il existe plusieurs lacunes au chapitre des connaissances sur les sécheresses qui limitent notre capacité de comprendre leur occurrence, de surveiller et de modéliser leur situation et de s'adapter à leurs effets négatifs. Nous exposons ci-après les principaux besoins en matière de recherche et de programmes concernant les sécheresses au Canada.

Occurrence des sécheresses

Nous devons acquérir une meilleure compréhension des causes et des caractéristiques physiques des sécheresses antérieures, y compris de leur variabilité spatiale et temporelle. Nous aurons ainsi un meilleur aperçu des projections à court terme (échelle saisonnière à annuelle) et à long terme (échelle décennale à centennale) des sécheresses à venir au Canada. Nous avons besoin, en particulier :

- d'en savoir plus sur les tendances relatives aux sécheresses et à la variabilité de celles-ci avant le début des relevés instrumentaux. Il faut pousser les recherches sur des indicateurs substitutifs fiables pour reconstruire l'occurrence des sécheresses dans diverses régions du Canada au cours des quelques derniers siècles;
- de mieux comprendre les causes physiques du déclenchement, de la persistance et de l'arrêt des sécheresses pendant les quelques derniers siècles, notamment :
  - le rôle des oscillations atmosphériques et océaniques à grande échelle dans le déclenchement et la persistance des régimes de circulation anormaux responsables de la sécheresse, en particulier pendant l'été;
  - les effets des anomalies de l'humidité des sols sur la persistance et la migration des sécheresses;
  - les causes physiques des sécheresses s'étendant sur plusieurs années et de leur répétition à des échelles décennales;
  - les régimes de circulation atmosphérique associés à des sécheresses exceptionnellement étendues (p. ex., la sécheresse de 2001 qui a touché la majeure partie du sud du Canada);

- les conditions atmosphériques responsables de l'arrêt des sécheresses, y compris les précipitations convectives, les mécanismes de déclenchement des précipitations et les sources d'humidité.

- d'en savoir davantage sur l'occurrence de sécheresses futures (régions probables et possibilités de variation de leur fréquence, de leur durée et de leur gravité), ce qui exige entre autres :
  - des simulations climatiques plus fiables (en particulier pour les précipitations) à partir de modèles du climat mondial et régional;
  - de meilleures méthodes d'étude des phénomènes de sous-échelle pour l'application de données climatiques modélisées à des échelles spatiales et temporelles appropriées;
  - des connaissances sur les changements qui toucheront les régimes de circulation ainsi que les oscillations de la circulation à grande échelle (ENSO, PDO, NAO, etc.).

Surveillance, modélisation et prévision

Si nous voulons être en mesure de prévoir le début, l'intensité et l'arrêt des sécheresses avec plus d'exactitude, il faut apporter des améliorations à la modélisation et à la surveillance des conditions de sécheresse actuelles ainsi qu'aux prévisions climatiques (saisonnières) à court terme. Voici les étapes que nous devons franchir pour améliorer notre capacité de surveiller, de modéliser et de prévoir les sécheresses au Canada.

- Amélioration de l'accessibilité à des données météorologiques antérieures et en temps quasi réel.
- Restauration et expansion du réseau de stations climatologiques pour assurer une couverture spatiale adéquate des observations météorologiques au pays.
- Élaboration d'une base de données sur les approvisionnements en eau totaux comprenant, par exemple, des données améliorées sur les relevés de débit des cours d'eau, le nombre de milieux humides et les ressources en eaux souterraines.
- Élaboration d'un indice ou d'une combinaison d'indices pour surveiller les conditions de sécheresse antérieures et en temps quasi réel et faciliter la reconnaissance hâtive des sécheresses. Des indices standard permettraient l'évaluation des sécheresses à l'échelle nationale.
- Meilleure compréhension du volume des eaux souterraines et de leur distribution, y compris les liens avec le climat et l'approvisionnement en eau de surface.
- Élaboration de méthodologies améliorées pour incorporer les technologies de télédétection et de détection radar au sol à la surveillance et à la gestion des sécheresses (pour augmenter le réseau de stations climatologiques). La capacité géospatiale et temporelle de l'imagerie satellitaire procure beaucoup de possibilités pour l'acquisition de techniques de surveillance plus poussées.
- Incorporation des techniques de systèmes d'information géographique (SIG) pour obtenir de meilleures représentations spatiales des sécheresses. Par exemple, les régimes de migration des sécheresses et les régimes de circulation synoptiques connexes pourraient être suivis à différentes échelles temporelles.
- Amélioration des techniques de modélisation hydrologique et, en particulier, des méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration.
- Intégration améliorée des modèles climatiques mondiaux et régionaux à des modèles distribués de bilan hydrique afin de modéliser les conditions de sécheresse futures.
- Augmentation de la fiabilité des prévisions à court terme (saisonnières) des températures et des précipitations aux échelles spatiales appropriées pour faciliter la prévision du début, de l'intensité, de la persistance et de l'arrêt des sécheresses.

Effets et adaptation

Il est certain qu'il y aura encore des sécheresses. En conséquence, il faut élaborer des stratégies d'adaptation à court et à long terme plus efficaces pour y faire face, y compris améliorer les technologies, la surveillance et les capacités de prévision. Des améliorations s'imposent à plusieurs égards :

- Mises à jour plus rapides des conditions de sécheresse potentielle pour déclencher la prise de mesures d'intervention et d'adaptation.
- Détermination des seuils des écosystèmes afin de déterminer à quel moment pendant une sécheresse les mesures d'adaptation doivent être prises pour éviter des pertes graves ou irréversibles. Le même principe s'applique aux seuils économiques.
- Augmentation de la recherche pour comprendre et modéliser les mesures d'adaptation à la sécheresse, y compris leur efficacité, leur caractère pratique, leurs coûts et leurs avantages.
- Amélioration des connaissances concernant l'adaptation aux sécheresses prolongées, y compris celles qui peuvent résulter des changements climatiques.
- Amélioration des capacités d'évaluer adéquatement les conséquences socio-économiques des diverses stratégies d'adaptation à la sécheresse.

Références

Groupe d'étude des sécheresses du SEA. 1986. Climatologie appliquée de la sécheresse *dans* les provinces des Prairies. Rapport no 86-4, Centre climatologique canadien. Downsview (Ont.). 197 p.

Bonsal, B.R., A.K. Chakravarti et R.G. Lawford. 1993. « Teleconnections between north Pacific SST anomalies

and growing season extended dry spells on the Canadian Prairies ». Int. J. Climatol. 13: 865-878.

Bonsal, B.R. et R.G. Lawford. 1999. « Teleconnections between El Niño and La Niña events and summer extended dry spells on the Canadian Prairies ». Int. J. Climatol. 19: 1445-1458.

Bonsal, B.R., A. Shabbar et K. Higuchi. 2001a. « Impacts of low frequency variability modes on Canadian winter temperature ». Int. J. Climatol. 21: 95-108.

Bonsal, B.R., X. Zhang, L.A. Vincent et W.D. Hogg. 2001b. « Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada ». J. Climate 14: 1959-1976.

Brotton, J. 1995. « Causes and impacts of 1960s low water levels on Canadian Great Lakes interests: phase 2 report ». Rapport préparé pour Environnement Canada, Groupe de recherche en adaptation environnementale, Burlington (Ont.) 60 p.

Brown, R.D. 2000. « Northern hemisphere snow cover variability and change, 1915-97 ». J. Climate 13: 2339-2355.

Burton, I., R.W. Kates et G.F. White. 1993. « The environment as a hazard ». The Guilford Press, New York. 290 p.

Chakaravarti, A.K. 1976. « Precipitation deficiency patterns in the Prairie Provinces of Canada. Prairie Forum ». The Journal of the Canadian Plains Research Centre 1: 95-110.

Conly, F.M. et G. van der Kamp. 2001. « Monitoring the hydrology of Canadian Prairie wetlands to detect the effects of climate change and land use changes ». J. Environ. Monitor. Assess. 67: 195-215.

Dey, B. 1982. « Nature and possible causes of droughts on the Canadian Prairies - case studies ». J. Climatol. 2: 233-249.

Gabriel, A.O. et R.D. Kreutzwiser. 1993. « Drought hazard in Ontario: a review of impacts, 1960-1989, and management implications ». Can. Water Resour. J. 18: 117-132.

Maybank, J., B.R. Bonsal, K. Jones, R.G. Lawford, E.G. O'Brien, E.A. Ripley et E. Wheaton. 1995. « Drought as a natural disaster ». Atmosphere-Ocean 33: 195-222.

McKay, G.A., R.B. Godwin et J. Maybank. 1989. « Drought and hydrological drought research in Canada ». Can. Water Resour. J. 14: 71-84.

Mitchell, J.G. 2002. « Down the drain? The incredible shrinking Great Lakes », p. 37-51. National Geographic, septembre 2002.

Nova Scotia Department of Agriculture and Fisheries. 2001. « Estimated impact of 2001 drought on agriculture in Nova Scotia ».

Palmer, W.C. 1965. « Meteorological drought ». U.S. Weather Bureau, Document de recherche 45, Washington, DC. 58 p.

Phillips, D. 1990. Les climats du Canada. Environnement Canada, Ottawa (Ont.). 176 p.

Sauchyn, D.J. et W.R. Skinner. 2001. « A proxy record of drought severity for the southwestern Canadian Plains ». Can. Water Resour. J. 26: 253-272.

Shabbar, A., B.R. Bonsal et M. Khandekar. 1997. « Canadian precipitation patterns associated with the Southern Oscillation ». J. Climate 10: 3016-3027.

Shabbar, A. et M. Khandekar. 1996. « The impact of El Niño-Southern Oscillation on the temperature field over Canada ». Atmosphere-Ocean 34: 401-416.

Skinner, W.R. 2002. « Update on western Canada drought: the Palmer Drought Severity Index ». Rapport non publié.

Skinner, W.R., B.J. Stocks, D.L. Martell, B.R. Bonsal et A. Shabbar. 1999. « The association between circulation anomalies in the mid-troposphere and area burned by wildland fire in Canada ». Theoret. Appl. Climatol. 63: 89-105.

Svoboda, M., D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus et S. Stephens. 2002. « The drought monitor ». Bull. Amer. Meteorolog. Soc. 83: 1181-1190.

Timmermann, A., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Esch, M. Latif et E. Roeckner. 1999. « Increased El Nino frequency in a climate model forced by future greenhouse warming ». Nature 398: 694-696.

Watson, R.T. et the Core Writing Team. 2001. « Climate change 2001: synthesis report ». Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. 34 p.

Wheaton, E.E. 2000. « Canadian prairie drought impacts and experiences », p. 312-330. *Dans* D. Wilhite (s. la dir. de), « Drought: a global assessment », volume I. Routledge Press, Londres, Angleterre.

Wilhite, D. 2000. « Drought as a natural hazard: concepts and definitions, Part I ». *Dans* D. Wilhite (s. la dir. de), « Drought: a global assessment », volume I. Routledge Press, Londres, Angleterre.

Zhang, X., K.D. Harvey, W.D. Hogg et T.R. Yuzyk. 2001. « Trends in Canadian streamflow ». Water Resour. Res. 37: 987-998.

Zhang, X., L.A. Vincent, W.D. Hogg et A. Niitsoo. 2000. « Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century ». Atmosphere-Ocean 38: 395-429.

Chapitre 4

INONDATIONS

Alain Pietroniro[1], Robert Halliday[2], Nicholas Kouwen[3], Donald H. Burn[3], Charles Lin[4] et Sal Figliuzzi[5]

[1] Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Saskatoon (Sask.)

[2] R. Halliday & Associates, Saskatoon (Sask.)

[3] Université de Waterloo, Département de génie civil, Waterloo (Ont.)

[4] Université McGill, Département des sciences atmosphériques et océaniques, Montréal (Qc)

[5] Ministère de l'environnement de l'Alberta, Direction de l'hydrologie, Edmonton (Alb.)

Situation actuelle

Au Canada, les inondations sont surtout, mais pas exclusivement, attribuables à des conditions hydrométéorologiques individuelles ou à une combinaison de celles-ci (Watt, 1989; Andrews, 1993). Elles peuvent être causées par des eaux de fonte excessives, la pluie, la chute de pluie sur de la neige, des embâcles ou des barrages naturels. Au nombre des causes anthropiques des inondations, on compte la modification du réseau hydrographique qui résulte de l'urbanisation et les ruptures de barrage. Brooks et al. (2001) indiquent qu'au cours du dernier siècle, les inondations ont causé au Canada des dommages d'une valeur dépassant 2 milliards de dollars et plus de 198 pertes de vie. Récemment, les inondations destructrices du Saguenay, à l'été 1996, et de la rivière Rouge, au printemps 1997, ont confronté les Canadiens à la réalité des catastrophes naturelles. Au Saguenay, l'inondation a été causée par des précipitations sans précédent au cours d'une période de 24 heures et a occasionné des dommages s'élevant à plus d'un milliard de dollars et 10 pertes de vie (Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages, 1997). L'« inondation du siècle » qui est survenue dans le sud du Manitoba a été le résultat d'une combinaison de facteurs hydrométéorologiques allant de l'humidité antérieure du sol à de fortes chutes de neige en hiver et à une fonte rapide au printemps. Même si cette inondation n'a provoqué aucune perte directe de vie, les dommages (y compris les coûts de la lutte contre l'inondation) ont été évalués à 500 millions de dollars au Canada et à plus de 2 milliards de dollars au total (CMI, 2000). Des inondations importantes peu fréquentes peuvent aussi franchir les seuils d'érosion le long des cours d'eau alluviaux et entraîner une érosion catastrophique du fond des vallées. Cette érosion représente un autre important risque inhérent aux inondations, qui s'ajoute aux dégâts causés par l'eau, et peut occasionner de lourdes pertes matérielles et d'infrastructure, même lorsque les biens se trouvent au-dessus du niveau des crues.

Le public perçoit souvent les inondations comme un danger naturel qui doit être atténué, et c'est dans ce contexte que le présent chapitre a été rédigé. Il importe toutefois de comprendre que les inondations ont des aspects écologiques bénéfiques qu'on oublie souvent d'envisager, mais qui constituent un élément important de la durabilité écologique. Ainsi, les changements du régime d'inondation du delta Paix-Athabasca, dans le nord de l'Alberta, ont été attribués à une diminution de la fréquence des embâcles par suite des changements climatiques et de la régulation des deux rivières (Prowse et Conly, 1996). Ces changements ont entraîné, à leur tour, une réduction des habitats du poisson et d'autres animaux et la perturbation de tout l'écosystème. On voit donc qu'une modification du régime des crues peut avoir des répercussions écologiques significatives. Le présent chapitre ne traite cependant pas de ces impacts; il se limite au risque naturel posé par les inondations.

Adaptation et atténuation

Depuis le début de la colonisation, les habitants du Canada ont choisi de vivre et de travailler près des cours d'eau et des lacs. En plus de fournir de l'eau potable, ces étendues d'eau sont des sources d'irrigation et d'énergie et des voies de transport, alors que leurs berges et les plaines inondables sont des endroits plaisants à habiter et où on peut facilement déverser des rejets industriels. Étant donné l'empiétement accru sur les plaines inondables naturelles qui accompagne la croissance de la population, les dommages causés par les inondations se sont élevés. Les mesures structurelles, comme les barrages, les digues et les canaux de dérivation, ont été conçues pour atténuer les risques d'inondation et donnent parfois aux résidents un faux sentiment de sécurité. Mais ces mesures peuvent également perturber les écosystèmes riverains. Les autres approches, y compris la régulation des plaines inondables et la prévision des crues, ont gagné de la faveur et constituent une bonne stratégie pour réduire les dommages. Les approches

structurelles ou autres qui visent l'adaptation et/ou l'atténuation exigent une analyse hydrologique approfondie qui inclut généralement l'analyse de la fréquence des inondations, des études de modélisation hydraulique et hydrologique et une solide conception technique.

La régulation des plaines inondables exige que celles-ci soient définies selon une élévation offrant un niveau de risque acceptable aux résidents qui vivent en haut de la zone définie et permettant une utilisation convenable (p. ex. parcs, aires de loisirs) de la plaine inondable. La délimitation d'une plaine inondable s'appuie généralement sur une valeur de débit du cours d'eau qui a été déterminée à des fins de régulation. De tels débits sont souvent fondés sur une analyse de la fréquence (propriétés statistiques) des débits historiques à un emplacement précis du cours d'eau (Burn, 2002). Dans les régions non jaugées, toutefois, ils peuvent également s'appuyer sur une analyse régionale et la comparaison des régions jaugées et non jaugées ou être fournis par l'application d'un modèle hydrologique à une averse type connue. Dans tous les cas, les débits résultants sont utilisés en conjugaison avec un modèle hydraulique afin de déterminer les niveaux des eaux dans un tronçon de cours d'eau ou à un endroit donné.

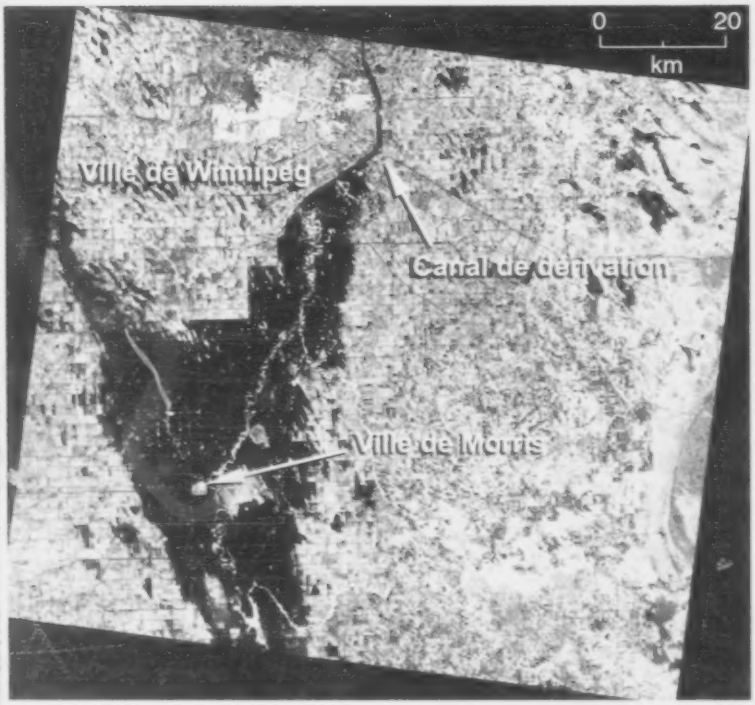


Image de Radarsat en mode standard 6 de l'« inondation du siècle » en 1997 près de Winnipeg, au Manitoba, prise le 1er mai 1997. On voit bien l'étendue de l'inondation, de même que la digue autour de la ville de Morris et le canal de dérivation protégeant la ville de Winnipeg. Copyright 1997 Agence spatiale canadienne. Traitement et diffusion des données réalisés par Radarsat International. Enrichissement et interprétation des données réalisés par le Centre canadien de télédétection.

Les élévations mesurées le long des berges deviennent la référence pour la majeure partie du zonage et de la planification qui concernent la plaine inondable. Au moment où le Programme fédéral-provincial de réduction des dommages causés par les inondations (PRDI) a pris fin, un programme dont l'objectif était de cartographier les régions urbaines sujettes aux inondations, environ 700 des 1 100 collectivités canadiennes menacées d'inondation ont été cartographiées (Shrubsole et al., 2003). Même si l'analyse du PRDI a tenu compte de la plupart des collectivités très exposées, de nombreux Canadiens ne savent pas encore qu'ils sont exposés aux inondations.

Les approches qui visent à atténuer les risques font habituellement appel à des ouvrages multifonctionnels, comme les imposants barrages. Ces ouvrages, qui sont souvent conçus pour conserver des débits faibles et à des fins de production d'hydroélectricité et d'irrigation, peuvent néanmoins protéger les collectivités en aval de certaines catastrophes. La conception de tels ouvrages doit comprendre l'analyse des grands débits possibles en vue de garantir un déversement adéquat et la sécurité du barrage. Les précipitations maximales probables (PMP) et l'inondation maximale probable (IMP) sont des critères couramment utilisés dans la conception et l'analyse de la sécurité des gros barrages au Canada (voir ci-après). Tout aménagement visant à lutter contre les inondations, comme un barrage, un canal de dérivation ou une digue, doit être non seulement bien conçu, mais également bien exploité et entretenu.

Prévision des crues

La prévision des crues est une approche clé en matière de réduction des pertes dues aux inondations, et les possibilités qu'elle offre méritent qu'on s'y attarde. La prévision fait généralement appel à un ou à plusieurs systèmes de modélisation, et de nombreux modèles hydrologiques et hydrauliques peuvent servir à cette fin. Les modèles hydrologiques peuvent avoir la simplicité d'une relation statistique entre les chutes de pluie et le ruissellement ou la complexité d'algorithmes détaillés s'appuyant sur la physique et décrivant tout le système de ruissellement pluvial. Les modèles hydrauliques, quant à eux, servent à calculer le temps de parcours de l'onde de crue et de son atténuation. Ces modèles utilisent les équations standard pour l'écoulement varié non permanent et diverses simplifications selon les caractéristiques du canal, les données disponibles et les exigences en matière de précision. Des modèles probabilistes qui tiennent compte des incertitudes des données sont également disponibles; ils appliquent une distribution statistique à des paramètres d'entrée, comme les prévisions de précipitations, et produisent un grand nombre de résultats, qui sont soumis à des analyses statistiques. La prévision ainsi obtenue fournit une distribution complète des conditions futures vraisemblables plutôt qu'un seul résultat.

structurelles ou autres qui visent l'adaptation et/ou l'atténuation exigent une analyse hydrologique approfondie qui inclut généralement l'analyse de la fréquence des inondations, des études de modélisation hydraulique et hydrologique et une solide conception technique.

La régulation des plaines inondables exige que celles-ci soient définies selon une élévation offrant un niveau de risque acceptable aux résidents qui vivent en haut de la zone définie et permettant une utilisation convenable (p. ex. parcs, aires de loisirs) de la plaine inondable. La délimitation d'une plaine inondable s'appuie généralement sur une valeur de débit du cours d'eau qui a été déterminée à des fins de régulation. De tels débits sont souvent fondés sur une analyse de la fréquence (propriétés statistiques) des débits historiques à un emplacement précis du cours d'eau (Burn, 2002). Dans les régions non jaugées, toutefois, ils peuvent également s'appuyer sur une analyse régionale et la comparaison des régions jaugées et non jaugées ou être fournis par l'application d'un modèle hydrologique à une averse type connue. Dans tous les cas, les débits résultants sont utilisés en conjugaison avec un modèle hydraulique afin de déterminer les niveaux des eaux dans un tronçon de cours d'eau ou à un endroit donné.

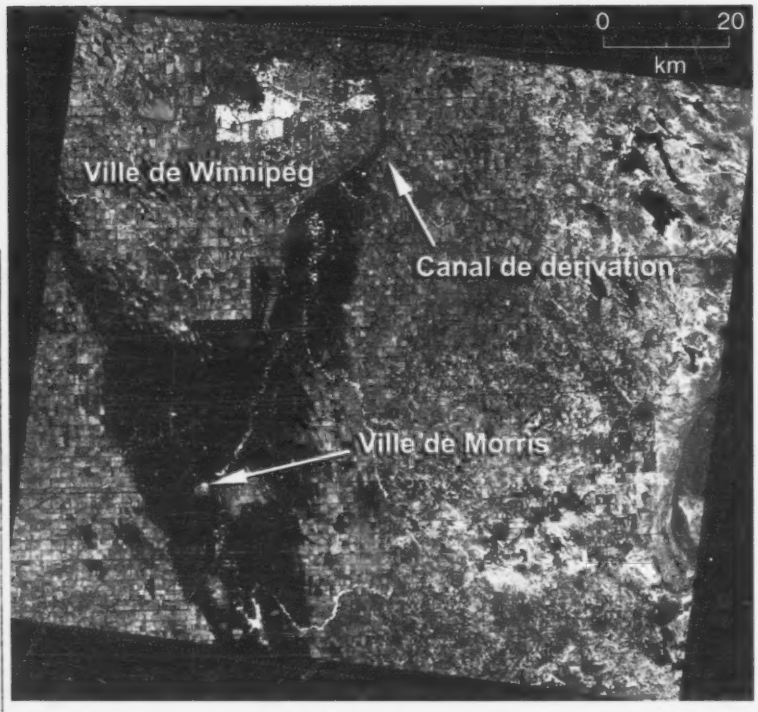


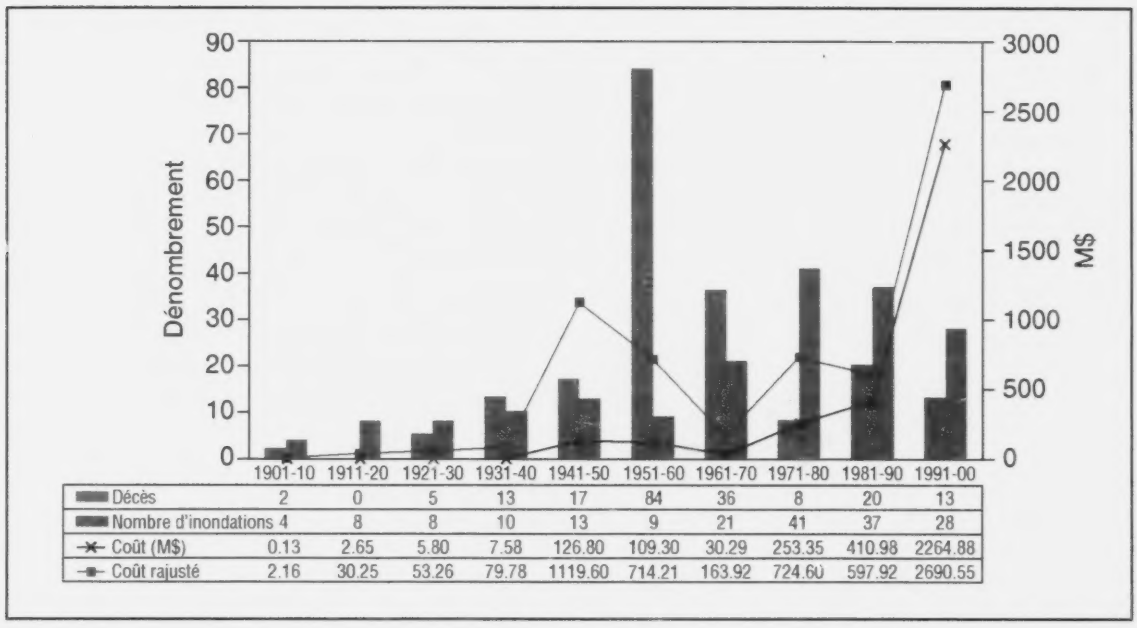
Image de Radarsat en mode standard 6 de l'« inondation du siècle » en 1997 près de Winnipeg, au Manitoba, prise le 1er mai 1997. On voit bien l'étendue de l'inondation, de même que la digue autour de la ville de Morris et le canal de dérivation protégeant la ville de Winnipeg. Copyright 1997 Agence spatiale canadienne. Traitement et diffusion des données réalisés par Radarsat International. Enrichissement et interprétation des données réalisés par le Centre canadien de télédétection.

Les élévations mesurées le long des berges deviennent la référence pour la majeure partie du zonage et de la planification qui concernent la plaine inondable. Au moment où le Programme fédéral-provincial de réduction des dommages causés par les inondations (PRDI) a pris fin, un programme dont l'objectif était de cartographier les régions urbaines sujettes aux inondations, environ 700 des 1 100 collectivités canadiennes menacées d'inondation ont été cartographiées (Shrubsole et al., 2003). Même si l'analyse du PRDI a tenu compte de la plupart des collectivités très exposées, de nombreux Canadiens ne savent pas encore qu'ils sont exposés aux inondations.

Les approches qui visent à atténuer les risques font habituellement appel à des ouvrages multifonctionnels, comme les imposants barrages. Ces ouvrages, qui sont souvent conçus pour conserver des débits faibles et à des fins de production d'hydroélectricité et d'irrigation, peuvent néanmoins protéger les collectivités en aval de certaines catastrophes. La conception de tels ouvrages doit comprendre l'analyse des grands débits possibles en vue de garantir un déversement adéquat et la sécurité du barrage. Les précipitations maximales probables (PMP) et l'inondation maximale probable (IMP) sont des critères couramment utilisés dans la conception et l'analyse de la sécurité des gros barrages au Canada (voir ci-après). Tout aménagement visant à lutter contre les inondations, comme un barrage, un canal de dérivation ou une digue, doit être non seulement bien conçu, mais également bien exploité et entretenu.

Prévision des crues

La prévision des crues est une approche clé en matière de réduction des pertes dues aux inondations, et les possibilités qu'elle offre méritent qu'on s'y attarde. La prévision fait généralement appel à un ou à plusieurs systèmes de modélisation, et de nombreux modèles hydrologiques et hydrauliques peuvent servir à cette fin. Les modèles hydrologiques peuvent avoir la simplicité d'une relation statistique entre les chutes de pluie et le ruissellement ou la complexité d'algorithmes détaillés s'appuyant sur la physique et décrivant tout le système de ruissellement pluvial. Les modèles hydrauliques, quant à eux, servent à calculer le temps de parcours de l'onde de crue et de son atténuation. Ces modèles utilisent les équations standard pour l'écoulement varié non permanent et diverses simplifications selon les caractéristiques du canal, les données disponibles et les exigences en matière de précision. Des modèles probabilistes qui tiennent compte des incertitudes des données sont également disponibles; ils appliquent une distribution statistique à des paramètres d'entrée, comme les prévisions de précipitations, et produisent un grand nombre de résultats, qui sont soumis à des analyses statistiques. La prévision ainsi obtenue fournit une distribution complète des conditions futures vraisemblables plutôt qu'un seul résultat.



	1901-10	1911-20	1921-30	1931-40	1941-50	1951-60	1961-70	1971-80	1981-90	1991-00
Décès	2	0	5	13	17	84	36	8	20	13
Nombre d'inondations	4	8	8	10	13	9	21	41	37	28
Coût (M$)	0.13	2.65	5.80	7.58	126.80	109.30	30.29	253.35	410.98	2264.88
Coût rajusté	2.16	30.25	53.26	79.78	1119.60	714.21	163.92	724.60	597.92	2690.55

Figure 1. Dommages causés par les inondations au Canada (d'après Brooks et al., 2001). Valeurs ajustées selon l'indice des prix de la construction (Kulshreshtha, 2003).

Sécurité des barrages

Des aspects de la sécurité des barrage sont décrits dans le chapitre 2, mais nous traiterons ici de la défaillance d'un barrage de protection contre les inondations en raison d'une crue exceptionnelle – ce qui est actuellement une préoccupation très importante pour de nombreux organismes provinciaux de gestion des inondations. Ces barrages à niveau de conséquences importantes sont souvent conçus pour supporter l'IMP qui est, selon la définition de la Federal Energy Regulatory Commission des États-Unis (2002), l'inondation qui résulterait de la combinaison la plus grave des conditions hydrométéorologiques critiques qui sont raisonnablement possibles dans le bassin hydrographique à l'étude. En théorie, la probabilité de dépasser l'IMP est nulle; le barrage peut donc supporter toutes les crues. On peut trouver une définition semblable dans les Directives relatives à la sécurité des barrages de l'Association canadienne des barrages (Association canadienne des barrages, 1998).

Étant donné que l'évaluation de l'IMP repose sur des données historiques, elle est réévaluée périodiquement à mesure qu'on recueille plus de données. Il peut arriver que l'IMP s'élève considérablement lorsque de nouvelles données s'ajoutent. Ainsi, Jarrett et Tomlinson (2000) citent l'exemple du barrage Olympus, au Colorado, pour lequel l'IMP révisée a été près de quatre fois plus élevée que l'évaluation initiale. Lorsque cela se produit, le barrage peut échouer au contrôle de sécurité, ce qui occasionne des frais importants pour revoir la conception du déversoir et refaire les travaux. La validité et la solidité des techniques d'évaluation de l'IMP sont donc des aspects fort préoccupants.

On calcule souvent l'IMP comme étant l'inondation produite par les précipitations les plus fortes qui soient possibles à un endroit donné à un moment particulier de l'année, ce qu'on appelle les PMP. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) a commandé l'élaboration d'un manuel décrivant des techniques d'évaluation des PMP (Organisation météorologique mondiale, 1986). Dans ce manuel, on explique qu'il est impossible de normaliser une méthode d'évaluation des PMP et que celle-ci doit probablement être modifiée selon la région visée (Organisation météorologique mondiale, 1986). Les techniques utilisées dépendent de la taille et de l'emplacement du bassin hydrographique, de la quantité et de la qualité des données disponibles pour le site et des conditions météorologiques qui sont à l'origine des fortes précipitations. De telles conditions sont particulièrement importantes dans les régions au relief élevé, comme la chaîne Côtière au Canada et aux États-Unis où il existe, en raison de facteurs orographiques, de forts gradients de précipitations. Ainsi, la paléohydrologie a révélé que les PMP évaluées pour les régimes montagneux sont généralement trop élevées (p. ex., Parrett et Jarrett, 2000). Selon le manuel de l'OMM, les PMP doivent être considérées comme une évaluation et on ne peut en évaluer objectivement la précision (Organisation météorologique mondiale, 1986). Par conséquent, il peut être nécessaire de modifier les procédures d'évaluation selon la région. Il conviendrait également de mettre en question le recours aux approches déterministes plutôt que statistiques pour évaluer les PMP et l'IMP. Abbs (1999) recommande de faire davantage appel à la modélisation numérique des pluies extrêmes.

Tendances

Adaptation et atténuation

L'amélioration des méthodes statistiques et les progrès technologiques réalisés en cartographie pourraient stimuler et renouveler les stratégies d'atténuation à de nombreux endroits du Canada. À l'heure actuelle, le gouvernement fédéral ne joue aucun rôle dans la gestion des plaines inondables; par ailleurs, certains gouvernements provinciaux ont mis fin à leurs programmes, alors que d'autres utilisent l'information fournie par le PRDI sans aucune modification. On peut s'interroger sur le fait que les renseignements hydrologiques résultant d'une meilleure compréhension et de périodes d'observation plus longues au cours des deux dernières décennies n'ont pas servi à réévaluer les risques d'inondation établis dans le cadre du PRDI. Si cette situation se prolonge, le risque de pertes matérielles et de vies attribuables aux inondations pourrait s'accroître et des ressources fédérales additionnelles devront être consacrées à l'aide aux sinistrés. Il serait donc sage d'examiner les risques d'inondation au Canada dans ce contexte ainsi qu'à la lumière de possibles modifications des régimes hydrographiques dues aux changements climatiques.

Pour ce qui est de l'amélioration de l'analyse des débits, la tendance récente a consisté à utiliser l'analyse régionale plutôt que l'analyse par site unique pour évaluer le courbes de fréquence des crues. Ainsi, le *Flood Estimation Handbook* (IH, 1999) récemment élaboré au Royaume-Uni intègre une approche régionale ciblée (Burn, 1990) visant l'évaluation de l'importance de crues types à un endroit donné. Il n'y a malheureusement aucun ensemble de directives semblables au Canada ni de normes ou directives fédérales actuelles en matière d'évaluation régionale. On utilise donc dans les différentes provinces diverses approches ayant un degré de raffinement variable.

Les techniques modernes de télédétection, comme le lidar (détection et télémétrie à l'aide de la lumière) à des fins de cartographie altimétrique et les technologies GPS, de concert avec les systèmes d'information géographique (SIG), permettent de réinventer les stratégies de cartographie des inondations. Il est maintenant possible de créer rapidement et à un coût relativement faible une représentation précise d'une plaine inondable.

Prévision et modèles

Les prévisions météorologiques combinées à l'information relative aux conditions du bassin hydrographique et à un modèle prévisionnel de l'écoulement d'un cours d'eau peuvent annoncer (jusqu'à 48 heures à l'avance) une possible crue soudaine, ce qui peut contribuer à sauver des vies et à réduire les dommages matériels. Les mesures et les prévisions des précipitations sont les éléments les plus incertains d'un système de prévision. Au cours des deux dernières décennies, les connaissances sur les phénomènes atmosphériques ont progressé, les ordinateurs sont devenus plus puissants et la modélisation numérique de l'atmosphère est maintenant possible. Le Centre météorologique canadien produit plusieurs modèles atmosphériques qui peuvent servir à des fins de modélisation météorologique à court terme, notamment le modèle aux éléments finis régional (RFE) (Mailhot et al., 1998), le modèle global environnemental multi-échelle (GEM) (Côté et al., 1998) et le modèle de mésoéchelle compressible communautaire (MC2) (Benoît et al., 1997). Ces modèles peuvent fonctionner dans un mode prévisionnel où les conditions atmosphériques initiales sont précisées et les caractéristiques physiques permettent de prévoir les conditions météorologiques futures (on utilise actuellement le modèle GEM à des fins de prévision météorologique au Canada).

La combinaison de prévisions hydrologiques et d'un modèle à haute résolution de prévision numérique du temps (PNT) bien étalonné peut non seulement fournir des données de substitution adéquates pour les précipitations mais, ce qui est plus important, permet également de calculer les débits de cours d'eau prévus avec des données de précipitations prévues. Une recherche a récemment été menée qui vise à développer davantage le couplage d'un modèle atmosphérique régional à haute résolution (p. ex. le modèle canadien MC2) et d'un modèle hydrologique (WATFLOOD) à des fins de prévision des crues. Pour ce faire, on a élaboré un cadre conceptuel de modélisation au moyen de différents degrés de couplage afin d'obtenir un modèle couplé complet bidirectionnel. Le premier niveau de couplage, dit « de liaison de modèles », exige d'étalonner et de valider séparément le modèle atmosphérique régional à haute résolution et le modèle hydrologique distribué. Cette forme de couplage utilise ensuite les précipitations simulées fournies par le modèle atmosphérique pour alimenter le modèle hydrologique servant à étudier les événements de crue soudaine. Une expérience en temps réel a été amorcée dans le cadre du projet Mesoscale Alpine Project (MAP) en 1999 afin de prévoir les crues soudaines dans les Alpes au moyen de prévisions numériques PNT des précipitations et des températures sur 24 heures (Kouwen et Benoît, 2002). Dans ce scénario de modélisation, les deux modèles utilisent leurs propres schéma et paramétrages de surface terrestre. Le forçage du modèle hydrologique est directement issu des prévisions atmosphériques et les précipitations constituent l'intrant dominant. Ces travaux présentent un grand intérêt puisque les précipitations constituent la variable la plus incertaine des études hydrologiques.

De façon à ce que les systèmes soient véritablement couplés, le lien entre les modèles (MC2 et WATFLOOD) a été établi par la mise en œuvre d'un schéma commun de surface terrestre (CLASS pour Canadian Land Surface

Scheme) dans chaque modèle. Ce travail a été effectué dans le cadre du programme de recherche sur la simulation des précipitations intenses et des inondations (SSPFF) financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. Les résultats, prometteurs, ont montré la capacité à prévoir adéquatement les précipitations et le débit en ce qui concerne l'inondation survenue au Saguenay en 1996. Depuis, des progrès ont été réalisés dans l'élaboration d'un système indépendant en vue du couplage de modèles atmosphériques et hydrologiques sans qu'un schéma commun de la surface terrestre soit nécessaire. Le cadre de modélisation décrit par Pietroniro et Soulis (2003) au cours de l'étude GEWEX du Mackenzie offre un contexte conceptuel pour d'autres percées en matière de couplage de tels modèles. On peut trouver dans Lin et al. (2002) l'exemple d'une étude de modélisation et de couplage pour l'inondation de 1996 au Saguenay. Ces réalisations, entre autres, pourraient faire progresser la recherche hydrologique et atmosphérique tout en maintenant les liens opérationnels. Des gains importants ont été faits pour ce qui est de l'utilisation de modèles hydrologiques distribués pour la prévision des crues; souvent, les variables de forçage météorologique sont les principales sources d'incertitude, notamment dans le cas des précipitations.

Impacts de l'aménagement du territoire

Selon la perception largement répandue au sein de la population, l'urbanisation et les changements dans l'aménagement du territoire qui surviennent dans les bassins supérieurs influent sur l'ampleur des fortes crues, ce qui n'est pas nécessairement vrai. De nos jours toutefois, les nouveaux lotissements doivent généralement être dotés de systèmes de gestion des eaux pluviales qui n'entraînent pas une augmentation du ruissellement. Cette obligation est souvent imposée par un règlement local. En l'absence d'une telle réglementation, il peut effectivement y avoir des augmentations du ruissellement. Il est peu probable que les changements qui surviennent actuellement dans les régions rurales en matière d'aménagement du territoire, comme la destruction des milieux humides ou les travaux de drainage, entraînent des modifications importantes ou prévisibles de la fréquence des fortes crues. Cela est attribuable au fait que les changements sont généralement plutôt modestes par rapport à la taille globale du bassin. De plus, pendant une forte crue, les conditions hydrométéorologiques ont tendance à surpasser les effets d'origine anthropique. Il serait néanmoins utile d'étudier les répercussions des changements dans l'aménagement du territoire sur les inondations de moindre importance, particulièrement dans les sous-bassins.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Cartographie des plaines inondables

Pour ce qui est de la gestion des inondations, dans la réalité, le public ne prend conscience de la menace d'inondation que lorsque qu'un tel événement se produit. Les progrès des approches statistiques, des SIG et des technologies de cartographie ainsi que l'amélioration des modèles de simulation font ressortir la nécessité de revoir les anciennes stratégies d'atténuation et d'adaptation. Les approches scientifiques établies en matière d'atténuation doivent donc être réexaminées à la lumière de ces progrès.

Un certain nombre d'approches peuvent permettre d'améliorer la détermination des crues provoquées à des fins de régulation, comme l'analyse régionale, qui doit s'ajouter à l'amélioration de l'analyse de la fréquence des inondations par station unique. L'analyse de la fréquence des inondations qui se fonde sur le registre historique des crues de pointe annuelles est aussi un outil de base pour l'établissement du débit nominal pour le zonage des plaines inondables ainsi que pour la conception de l'infrastructure de protection contre les inondations et des ouvrages qui enjambent les cours d'eau. L'analyse de la fréquence des crues repose sur l'hypothèse de base que les tendances ou les cycles climatiques n'influent pas sur les débits de crue. Or, il est prouvé que cette hypothèse est erronée (Gosnold et al., 2000) et que même de légers changements climatiques peuvent modifier considérablement l'ampleur des crues (Knox, 1993). Les répercussions des changements climatiques sur les précipitations devraient également être examinées, y compris les courbes mises à jour de l'intensité, de la durée et de la fréquence des précipitations, qui sont essentielles à la conception technique en milieu urbain.

Avec l'avènement des techniques de télédétection, notamment le lidar et le GPS, utilisées conjointement avec les SIG, et des radars d'observation météorologique et comme les modèles de PNT peuvent mieux prévoir les précipitations (prévision immédiate et prévision à posteriori), le temps est venu de revoir les stratégies d'atténuation basées sur la cartographie et la prévision des inondations. L'application de modèles hydrologiques et hydrauliques en conjugaison avec des modèles atmosphériques dans un cadre probabiliste peut être un moyen viable d'étudier d'éventuels scénarios futurs de changements climatiques dans le contexte de la cartographie des plaines inondables. Il faudrait également examiner les analyses statistiques et régionales des inondations améliorées dans le contexte des changements climatiques.

Prévision et modèles

Les modèles mathématiques jouent un rôle de plus en plus important dans l'atténuation et la prévision des inondations. Toutefois, deux tendances méritent qu'on y

consacre un grand effort de recherche. Premièrement, en raison de la disponibilité accrue de données de télédétection (p. ex. précipitations, équivalent en eau de la neige ou évapotranspiration), il faut modifier les modèles pour qu'ils acceptent les données distribuées spatialement en plus des données ponctuelles classiques. Il est essentiel de perfectionner les algorithmes pour transformer les donnée en information utile, entre autres les algorithmes d'assimilation des données qui font appel à des combinaisons de données d'observation et de modélisation, afin d'améliorer la modélisation des précipitations et, donc, les prévisions hydrologiques. De toute évidence, il faut aussi améliorer constamment les modèles météorologiques opérationnels.

Les chercheurs en hydrologie doivent se concentrer sur des systèmes de modélisation hydrologique qui sont compatibles avec les approches de modélisation atmosphérique. Dans ce sens, il faudrait encourager fortement les recherches sur des modèles distribués basés sur la physique qui peuvent être liés ou couplés avec des modèles atmosphériques. Ces modèles distribués devraient être fondés sur les schémas de la surface terrestre des modèles atmosphériques existants, établir un lien entre l'atmosphère et la surface terrestre et simuler tant le bilan hydrique que le bilan énergétique à la surface terrestre. Les modèles hydrologiques fondés sur la physique permettent un examen plus rigoureux de phénomènes hydrologiques discrets, comme les précipitations, l'interception, l'infiltration, l'écoulement hypodermique et l'écoulement de base (Soulis et al., 2000). Ils devraient servir, par exemple, à examiner les répercussions de l'activité humaine sur un bassin hydrographique. Des questions comme les effets de la conversion de terres à des fins agricoles (p. ex. le drainage accru ou la destruction de milieux humides) sur les volumes et les crêtes de ruissellement suscitent un intérêt considérable dans le public. Les chercheurs devraient élaborer de tels modèles s'appuyant sur des expériences impliquant un processus continu et applicables à l'échelle d'un bassin hydrographique. Compte tenu de la diversité des paysages et de l'hétérogénéité de la surface terrestre, l'amélioration continue des modèles hydrologiques exige une bonne synergie entre ceux qui mènent les expériences et ceux qui élaborent les modèles hydrologiques.

Besoins en matière de données

- Un forçage atmosphérique et des informations hydrologiques précis sont essentiels pour la modélisation hydrologique et la conception des infrastructures, particulièrement dans le contexte des changements climatiques. Il faudrait élaborer une approche hydrométéorologique plus cohérente à la conception des réseaux. Les débits jaugés sont des intégrateurs du forçage atmosphérique, et le réseau canadien devrait refléter cette réalité.
- Des techniques permettant d'utiliser efficacement les valeurs estimatives des précipitations fournies par les radars au sol sont essentielles à l'amélioration de la conception des infrastructures et de l'atténuation des effets des crues.
- Les ensembles de données sur les variables cryosphériques, entre autres l'équivalent en eau de la neige (EEN) et l'étendue du manteau nival, fournissent une information vitale aux spécialistes de la prévision des crues. Il n'y a pas de mécanisme systématique permettant d'évaluer ces quantités ni d'archives de ces données.
- La technologie moderne permet d'établir des stations de surveillance in situ de l'humidité du sol. Ces types de données, qui pourraient être recueillies dans l'infrastructure actuelle, sont des éléments d'entrée essentiels des méthodes d'assimilation des données.
- Des recherches continues s'imposent pour l'élaboration de méthodes fiables de télédétection à des fins de surveillance de l'humidité du sol, de l'EEN et d'autres importantes variables d'état par rapport à différents types de couverture terrestre et de terrain au Canada.
- Des modèles altimétriques numériques (MAN) haute résolution d'une grande précision sont nécessaires pour diverses applications.
- Les utilisateurs éventuels doivent être informés sur les produits de PNT qui pourraient être utiles pour la prévision opérationnelle des inondations (comme les prévisions distribuées du ruissellement ou de l'humidité du sol à l'échelle locale) et qui pourraient aussi être archivés et mis à la disposition des responsables de la conception des infrastructures. Les variables créées par assimilation des données de PNT représentent l'estimation optimale de l'état de l'atmosphère et de la surface terrestre et, lorsque c'est possible, constituent un assemblage de données modélisées et de données observées.

Besoins en matière de recherches

- À l'heure actuelle, la technologie utilisée dans les modèles de prévision opérationnelle est de 10 à 20 ans en retard par rapport à celle des modèles de recherche, même si certains modèles opérationnels ont été mis à niveau de façon à inclure de nouvelles sources de données. Il faut mettre à l'essai en milieu opérationnel des modèles nouveaux qui sont plus élaborés. La principale différence entre ces applications se situe dans la mise en oeuvre et l'utilisation des données spatiales, tant sur le plan du forçage météorologique (ce qui comprend les données météorologiques d'entrée en temps réel issues de l'assimilation et les variables d'état mesurées par télédétection) que sur le plan physiographique (p. ex. modèles MAN, information sur la couverture terrestre fournie par satellite).

- L'analyse de la fréquence des inondations qui se fonde sur le registre historique des crues de pointe annuelles est aussi un outil de base pour l'établissement du débit nominal pour le zonage des plaines inondables ainsi que pour la conception de l'infrastructure de protection contre les inondations et des ouvrages qui enjambent les cours d'eau. L'analyse de la fréquence doit reposer sur une hypothèse de stationnarité de manière que les tendances ou les cycles climatiques n'influent pas sur les débits de crue. Or, il est prouvé que cette hypothèse est erronée (Gosnold et al., 2000) et que même de légers changements climatiques peuvent modifier considérablement l'ampleur des crues (Knox, 1993). Le défi qui se pose aux chercheurs est de parvenir à incorporer les changements climatiques à l'analyse de la fréquence des crues à des fins de planification.
- L'utilisation de modèles météorologiques couplés à des modèles hydrologiques pourrait être un des seuls moyens d'examiner les futurs scénarios d'adaptation et d'atténuation. En outre, on peut facilement mettre en question les hypothèses d'homogénéité et d'indépendance des séries chronologiques des débits de pointe, particulièrement lorsqu'on évalue les registres météorologistes et hydrométriques canadiens, qui couvrent des périodes relativement courtes (Booy et Morgan, 1985; Klemes, 1987; Watt, 1989). Il faut envisager un certain nombre d'approches, dont l'analyse régionale, pour espérer améliorer la détermination des crues provoquées à des fins de régulation, en plus d'améliorer l'analyse traditionnelle de la fréquence des inondations par station unique.
- Il faudrait examiner la méthode de calcul de l'IMP ou des averses nominales, particulièrement dans le contexte des changements climatiques. Les averses nominales dérivées de données historiques (p. ex. courbes de l'intensité, de la durée et de la fréquence et débits centennaux estimés) peuvent avoir changé considérablement pour certaines régions du pays. Il est très important de réévaluer ces critères de conception selon une approche déterministe en matière de modélisation et de statistique.
- Il est fort probable que les seuils d'érosion soient franchis pendant de fortes crues le long de cours d'eau là où la forme du chenal est proche de la transition méandres-tresses. Une meilleure compréhension du seuil d'érosion permettrait de savoir quels tronçons de cours d'eau sont exposés à une érosion à grande échelle pendant les crues extrêmes ainsi que d'évaluer la vulnérabilité des aménagements et de l'infrastructure du fond des vallées à cette érosion.

Références

Abbs, D.J. 1999. « A numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maximum precipitation ». Water Resour. Res. 35(3): 785-796.

Andrews, J. (dir. de publ.). 1993. Inondations, cahier de l'eau du Canada, ministère des Approvisionnements et Services, Ottawa.

Association canadienne des barrages. 1998. Directives relatives à la sécurité des barrages. Edmonton (Alberta).

Benoit, R., M. Desgagné, P. Pellerin, S. Pellerin, Y. Chartier et S. Desjardins. 1997. « The Canadian MC2: a semi-Lagrangian, semi-implicit wideband atmospheric model suited for finescale process studies and simulation ». Monthly Weather Review 125: 2382-2415.

Booy, C. et D.R. Morgan. 1985. « The effect of clustering of flood peaks on a flood risk analysis for the Red River ». Can. J. Civil Eng. 12: 150-165.

Brooks, G.R., S.G. Evans et J.J. Clague. 2001. « Flooding », p. 101-143. *Dans* G.R. Brooks (s. la dir. de), « A synthesis of natural geological hazards in Canada ». Commission géologique du Canada Bulletin 548. Ottawa.

Burn, D.H. 2002. « Hydrological extremes », p. 1017-1021. *Dans* El-Shaarawi, A. et W. Piegorsch (s. la dir. de), « Encyclopedia of environmetrics », Volume 2. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.

CMI. 2000. Vivre le long de la rivière Rouge. Rapport aux gouvernements du Canada et des États-Unis sur les mesures d'atténuation des impacts des inondations *dans* le bassin de la rivière Rouge. Commission mixte internationale, Ottawa et Washington.

Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages. 1997. Association canadienne des barrages, Québec.

Côté, J., S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch et A. Staniforth. 1998. « The operational CMC-MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part I: design considerations and formulation and Part II: results ». Monthly Weather Review 126: 1373-1418.

Federal Energy Regulatory Commission. 2002. « Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects ». Washington, D.C. 644 p. Disponible à : http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/eng-guide.asp. Site Internet visité le 2 octobre 2003.

Gosnold, W.D., J.A. LeFever, P.E. Todhunter et L.F. Osbourne Jr. 2000. « Rethinking flood prediction: does the traditional approach need to change? » Geotimes 45: 20-23.

IH (Institute of Hydrology). 1999. « Flood Estimation Handbook ». Centre for Ecology and Hydrology Wallingford. Wallingford, U.K.

Jarrett, R.D. et E.M. Tomlinson. 2000. « Regional interdisciplinary paleoflood approach to assess extreme flood potential ». Water Resour. Res. 36(10): 2957-2984.

Klemes, V. 1987. « Hydrological and engineering relevance of flood frequency analysis ». *Dans* V.P. Singh (s. la dir. de), « Hydrologic frequency modelling ». Kluwer Academic Publishers.

Knox, J.C. 1993. « Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate ». Nature 361: 430-432.

Kouwen, N. et R. Benoit. 2002. « Regional forecasting of river flows using a high resolution numerical weather model

coupled to a hydrological model ». *Dans* « Proceedings, International conference on flood estimation », Berne, Suisse, mars 6-8, 2002.

Kulshreshtha, S. 2003. Communication personnelle.

Lin, C.A., L. Wen, M. Béland et D. Chaumont. 2002. « A coupled atmospheric-hydrological modeling study of the 1996 Ha! Ha! River basin flash flood in Quebec, Canada ». Geophys. Res. Lett. 29(2): 13/1-13/4.

Mailhot, J., S. Bélair, R. Benoit, B. Bilodeau, Y. Delage, L. Fillion, L. Garand, C. Girard et A. Tremblay. 1998. « Scientific description of RPN physics library, Version 3.6 ». Recherche en Prévision Numérique, Service de l'environnement atmosphérique, Dorval (Québec. Disponible à : http://www.cmc.ec.gc.ca/rpn. Site visité le 2 octobre 2003.

Organisation météorologique mondiale. 1986. Manual for estimation of probable maximum precipitation. Operational Hydrology Report No. 1, WMO No. 332, Geneva, Switzerland.

Parrett, C. et R.D. Jarrett. 2000. « Flood hydrology for Dry Creek, Lake County, Northwestern Montana », p. 4.13.1-4.13.10. *Dans* Hotchkiss, R.H. et M. Glade (s. la dir. de), « Proceedings, building partnerships: joint conference on water resources engineering and water resources planning & management ». ASCE.

Pietroniro, A. et E.D. Soulis. 2003. « A hydrology modelling framework for the Mackenzie GEWEX Program ». Hydrolog. Process. 17: 673-676.

Pietroniro, A., E.D. Soulis, K. Snelgrove et N. Kouwen. 2001. « A framework for coupling atmospheric and hydrological models ». *Dans* Dolman, A.J., A.J. Hall, M.L. Kavvas, T. Oki et J.W. Pomeroy (s. la dir. de), « Soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and large scale hydrological models ». IAHS Publication No. 270.

Prowse, T. et M. Conly. 1996. « Impacts of flow regulation on the aquatic ecosystem of the Peace and Slave rivers. Northern River Basins Study Synthesis Report No. 1 ».

Shrubsole, D., G. Brooks, R. Halliday, E. Haque, A. Kumar, J. Lacroix, H. Rasid, J. Rousselle et S.P. Simonovic. 2003. « An assessment of flood risk management in Canada ». ICLR Research Paper Series - No. 28. Institute for Catastrophic loss Reduction. Université de Western Ontario.

Soulis, E.D., K.R. Snelgrove, N. Kouwen, F. Seglenieks et D.L. Verseghy. 2000. « Towards closing the vertical water balance in Canadian atmospheric models: coupling of the land surface scheme CLASS with the distributed hydrological fodel WATFLOOD ». Atmosphere-Ocean 38(1): 251-269.

Watt, W.E. (s. la dir. de). 1989. « Hydrology of floods in Canada: a guide to planning and design ». Associate Committee on Hydrology, National Research Council, Ottawa.

Chapitre 5

APPROVISIONNEMENT EN EAU DES MUNICIPALITÉS ET DÉVELOPPEMENT URBAIN

Jiri Marsalek[1], W. Edgar Watt[2], Liz Lefrançois[3], Ben F. Boots[4] et Stan Woods[5]

[1] Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington (Ont.)

[2] Université Queen's, Département de génie civil, Kingston (Ont.)

[3] Environnement Canada, Sensibilisation à l'eau et conservation de l'eau, Ottawa (Ont.)

[4] Buffalo Pound Water Administration Board, Regina (Sask.)

[5] District régional de Vancouver, Planification régionale des services publics, Section des politiques et de la planification, Burnaby (C.-B.)

Situation actuelle

Le développement urbain influe sur les ressources en eau. Il modifie le cycle hydrologique et accroît la demande de services reliés à l'eau dans les zones touchées. Parmi les modifications que connaît le cycle hydrologique, mentionnons une altération des flux d'eau, de sédiments, de produits chimiques et de microorganismes ainsi qu'une augmentation des rejets thermiques. En général, ces modifications provoquent la modification des régimes d'écoulement et de sédimentation, les changement géomorphologiques, la diminution de la qualité de l'eau, la réduction de la biodiversité et une dégradation généralisée des ressources en eau. Parallèlement, l'expansion des populations urbaines accroît la demande de services reliés à l'eau, entre autres l'approvisionnement en eau, le drainage, la collecte et l'épuration des eaux usées et les utilisations bénéfiques des eaux réceptrices. La gestion intégrée des eaux urbaines permet d'atténuer les conflits entre les différentes demandes de services reliés à l'eau découlant du développement urbain et l'incidence de ces demandes sur les ressources en eau locales. Le présent chapitre expose des aspects particuliers de l'incidence du développement urbain sur les eaux réceptrices et certaines menaces pour l'eau disponible aux fins de l'approvisionnement des municipalités. L'accent a été mis sur des questions relatives au volume et à la disponibilité des ressources en eau; toutefois, certains aspects de la qualité ont été abordés au besoin.

Incidence du développement urbain sur les ressources en eau

Il sera question d'abord du volume des ressources en eau et ensuite, de leur qualité.

Par comparaison aux bassins hydrographiques naturels, le cycle hydrologique dans les zones urbaines fait l'objet de modifications importantes. Des modifications peuvent survenir dans la phase atmosphérique (événements météorologiques et microclimats locaux qui, par exemple, augmentent les précipitations en aval des municipalités, accroissent la fréquence de brouillard et haussent la température de l'air).

Au nombre des modifications dans la phase terrestre du cycle hydrologique, on compte l'élévation des volumes et des débits de l'écoulement de surface qui contribue aux inondations ou à des accumulations d'eau (voir le chapitre 4). Comptent également parmi celles-ci, l'érosion accrue, la modification du régime de sédimentation en ce qui a trait au transport et au dépôt (envasement) des sédiments ainsi que la modification de la géomorphologie des cours d'eau, la diminution de l'évapotranspiration, la baisse de l'infiltration, la pollution des eaux souterraines, l'élévation de la température des eaux réceptrices, la stratification densimétrique et les répercussions sur les milieux humides (égouttement et pollution).

Une imperméabilité accrue du sol peut réduire l'alimentation des eaux souterraines; toutefois, les fuites de conduites d'eau ou d'égouts et une infiltration intentionnelle (eaux de ruissellement des toits et eaux pluviales) réalisée dans certaines zones urbaines peuvent partiellement compenser cette réduction. Selon le groupe American Rivers, l'expansion tentaculaire du milieu urbain et l'imperméabilité accrue du sol dans les zones d'écoulement de l'eau réduisent l'alimentation des eaux souterraines. Dans les zones urbaines où l'expansion s'est faite très rapidement, à savoir de 1982 à 1997 (Atlanta, en Géorgie, p. ex.), on estime que la réduction de l'alimentation est de 200 à 500 millions de mètres cubes par année (American Rivers, 2002). Qualitativement, on obtiendrait des résultats similaires dans des zones urbaines canadiennes à expansion rapide.

La demande de services reliés à l'eau a pour effet d'accroître les prélèvements d'eau à la source, ce qui peut avoir une incidence sur d'autres utilisations des eaux réceptrices (répartition de la ressource, débits faibles et élevés, habitat et écologie des cours d'eau ainsi que

niveaux des eaux souterraines). Le retour de débit/le lavage à contre-courant des filtres et les résidus des stations de traitement peuvent contribuer à la pollution de l'eau. Au chapitre de la collecte et de la gestion des eaux usées, l'évacuation des effluents vers les eaux réceptrices peut causer de la pollution et avoir des répercussions sur le régime. Des égouts sanitaires ou unitaires qui fuient peuvent contribuer à la pollution des eaux souterraines.

Les modifications majeures au régime hydrologique attribuables au développement urbain influent sur les utilisations sur place de l'eau, à savoir les loisirs (natation, navigation de plaisance et pêche); l'exploitation de réservoirs à buts multiples (compétition entre les demandes pour l'approvisionnement en eau, les loisirs, la production d'énergie hydroélectrique et les opérations d'un réservoir nécessaires pour la protection contre les inondations); les fonctions esthétique et écologique des eaux réceptrices.

Les effets précis des écoulements urbains (eaux d'orage) sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes ont été exposés dans un rapport complémentaire intitulé *Menaces pour les sources d'eau potable et les écosystèmes aquatiques au Canada* (Environnement Canada, 2001). Voici un résumé de ces effets.

Les rejets d'eaux pluviales d'orage en zone urbaine ont des effets physiques, chimiques, microbiologiques et combinés sur la qualité de l'eau.

Effets physiques

- Élévation du débit (cause les inondations, l'érosion et l'affouillement d'habitats).
- Modification du régime de sédimentation (cause la destruction d'habitats, nuit aux phénomènes contribuant à la qualité de l'eau, influe sur la vie aquatique et favorise le transport de contaminants).
- Apport d'énergie thermique (cause de la pollution thermique et la réduction des stocks de poissons d'eau froide).
- Stratification densimétrique (nuit au brassage vertical et à l'oxygénation des eaux de fond) (Marsalek et al., 2001).

Produits chimiques rejetés avec les eaux pluviales d'orage

- Produits chimiques organiques biodégradables (contribuent à l'épuisement de l'oxygène dissous) et éléments nutritifs (à l'origine de l'eutrophisation).
- Métaux à l'état de traces, chlorure, polluants organiques persistants (POP) et hydrocarbures (contribuent à la toxicité aiguë et chronique ainsi qu'à la génotoxicité).

Les microorganismes transportés par les eaux pluviales d'orage (bactéries et virus d'origine fécale) et leurs rejets causent la fermeture de plages et la contamination de lieux de cueillette de mollusques et de crustacés. D'ordinaire, l'action combinée des effets physiques, chimiques et microbiologiques est présente dans les eaux réceptrices et mesurée en fonction du comportement observé au sein des communautés animales et végétales (Marsalek et al., 2001).

Les effluents des stations d'épuration municipales ont des effets chimiques, microbiologiques et combinés sur les eaux réceptrices. Voici les produits chimiques dangereux présents dans ces effluents.

- Constituants habituels (matières en suspension, produits chimiques provoquant une demande biochimique et chimique en oxygène, éléments nutritifs).
- Substances toxiques (chlore, ammonium, produits chimiques organiques à l'état de traces, métaux à l'état de traces).
- Nouveaux produits chimiques dangereux (perturbateurs endocriniens, produits pharmaceutiques et thérapeutiques, antibiotiques).

Au nombre des microorganismes présents dans les effluents figurent les bactéries, les virus, les helminthes et les protozoaires susceptibles de s'y retrouver. Font partie des principales conséquences des rejets d'effluents des stations d'épuration municipales : la restriction de la consommation de poissons, de mollusques et de crustacés; la dégradation des populations aquatiques et fauniques ainsi que de leurs habitats (qualité de l'eau et des sédiments, entre autres); l'eutrophisation et le développement indésirable d'algues; les cas isolés de maladies causées par la contamination microbienne d'eau potable; la fermeture de plages; la dégradation des qualités esthétiques; les frais supplémentaires que doivent payer les utilisateurs agricoles, industriels et municipaux pour traiter l'eau (Chambers et al., 1997).

Les effluents des stations d'épuration municipales peuvent nuire à l'écosystème aquatique en causant : la modification de l'équilibre chimique, de la dynamique énergétique et du réseau trophique; la dispersion et la migration des espèces; la perturbation du développement des écosystèmes; la réduction de la biodiversité; la disparition d'espèces critiques; la réduction de la diversité génétique (Lijklema et al., 1993).

Menaces pour l'approvisionnement en eau des municipalités

Le Canada compte de nombreuses sources d'eau. Selon une récente étude internationale (*Water Poverty Index*) (Sullivan, 2002), il vient au deuxième rang après la Finlande. L'indice dont il est question tient compte des ressources en eau (débits internes et entrants, population), de l'accès (pourcentage de la population desservi par des aqueducs et des installations d'assainissement, ayant accès à de l'eau d'irrigation), des utilisations (domestiques, industrielles et agricoles), des ressources (humaines et financières pour gérer le réseau) et de l'en-

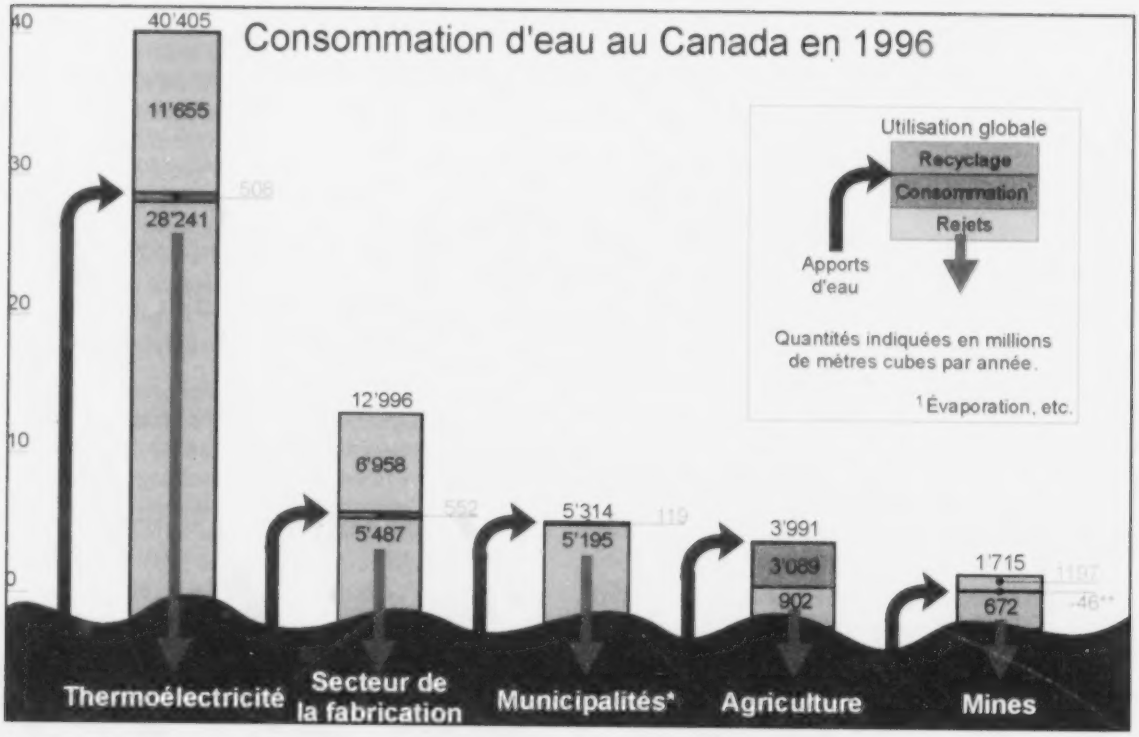


Figure 1. Consommation d'eau au Canada en 1996 (Environnement Canada, 2002b).

vironnement (indicateur de l'intégrité écologique ou quantité des ressources en eau pour répondre aux besoins environnementaux). Malgré cette évaluation favorable des ressources en eau au Canada, certains endroits ont été privés d'eau pour des raisons de pénuries ou de qualité d'eau inacceptable. De 1994 à 1999, environ 26 % des municipalités dotées de réseaux d'aqueduc ont connu des pénuries d'eau. Parmi les causes invoquées, mentionnons les pénuries saisonnières dues à la sécheresse, le vieillissement de l'infrastructure et l'accroissement de la consommation. Selon une étude sur la consommation de l'eau publiée par Environnement Canada (2002b), les municipalités tributaires des aquifères ont rapporté être plus souvent exposées à des pénuries que celles dont l'approvisionnement est assuré par des eaux superficielles. Les résultats régionaux peuvent différer des résultats nationaux de cette étude.

Consommation d'eau des municipalités - L'exposé sur les menaces pour l'approvisionnement en eau des municipalités portera d'abord sur la consommation d'eau de ces dernières et ensuite, sur les questions reliées aux sources, à l'infrastructure pour le traitement et la distribution de l'eau. Cette séquence, fidèle à l'approche à barrières multiples pour la protection de l'eau potable, sera observée dans le présent chapitre.

La consommation d'eau des municipalités correspond à la quantité totale d'eau fournie par le réseau d'aqueduc municipal. Environnement Canada (2002a) classe la consommation d'eau dans les catégories suivantes : résidentielle, commerciale, industrielle et « autre ». La catégorie « autre » englobe les pertes attribuables aux fuites, les utilisations non comptabilisées, notamment pour la lutte contre les incendies et le rinçage des réseaux de distribution, ainsi que les autres utilisations n'ayant pu être classées dans les trois autres catégories. Les meilleurs indicateurs de la consommation d'eau dans les zones urbaines sont les suivants : consommation d'eau d'une municipalité de 638 litres par habitant par jour (moyenne nationale de 1999 pour l'ensemble des secteurs municipaux) et consommation d'eau dans le secteur résidentiel de 343 litres par habitant par jour. Ce dernier indicateur représente plus de la moitié de la consommation d'eau des municipalités au Canada, laquelle varie de 240 à 460 litres par habitant par jour. Les valeurs correspondantes sont très inférieures dans le Nord canadien (Environnement Canada 2002a,c).

Selon l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE, 1999), la consommation par habitant dans le secteur résidentiel au Canada demeure l'une des plus élevée parmi les pays développés (à ce titre, le Canada fait partie d'un groupe comprenant les États-Unis, l'Australie et le Japon). Il convient de noter (figure 1) que la consommation d'eau des municipalités ne représente que 11 % de la consommation totale (prélèvements) canadienne; les autres principaux secteurs d'utilisation sont ceux de l'agriculture, des mines, de la fabrication et de la production de thermoélectricité.

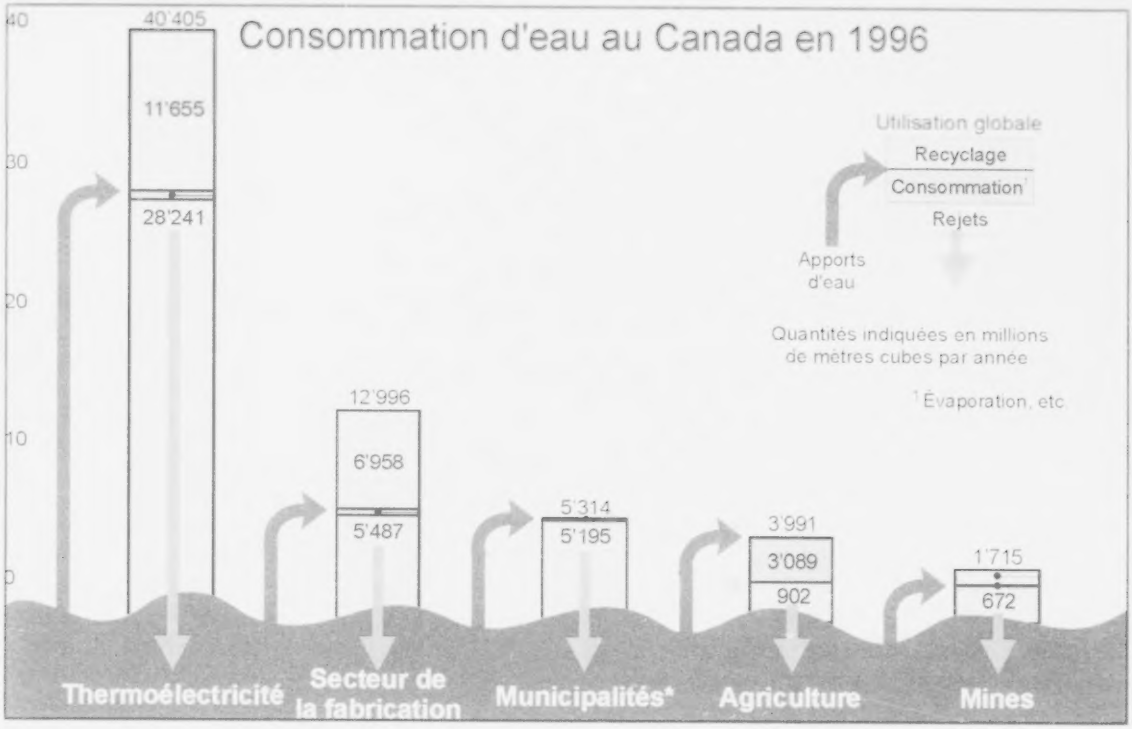


Figure 1. Consommation d'eau au Canada en 1996 (Environnement Canada, 2002b).

vironnement (indicateur de l'intégrité écologique ou quantité des ressources en eau pour répondre aux besoins environnementaux). Malgré cette évaluation favorable des ressources en eau au Canada, certains endroits ont été privés d'eau pour des raisons de pénuries ou de qualité d'eau inacceptable. De 1994 à 1999, environ 26 % des municipalités dotées de réseaux d'aqueduc ont connu des pénuries d'eau. Parmi les causes invoquées, mentionnons les pénuries saisonnières dues à la sécheresse, le vieillissement de l'infrastructure et l'accroissement de la consommation. Selon une étude sur la consommation de l'eau publiée par Environnement Canada (2002b), les municipalités tributaires des aquifères ont rapporté être plus souvent exposées à des pénuries que celles dont l'approvisionnement est assuré par des eaux superficielles. Les résultats régionaux peuvent différer des résultats nationaux de cette étude.

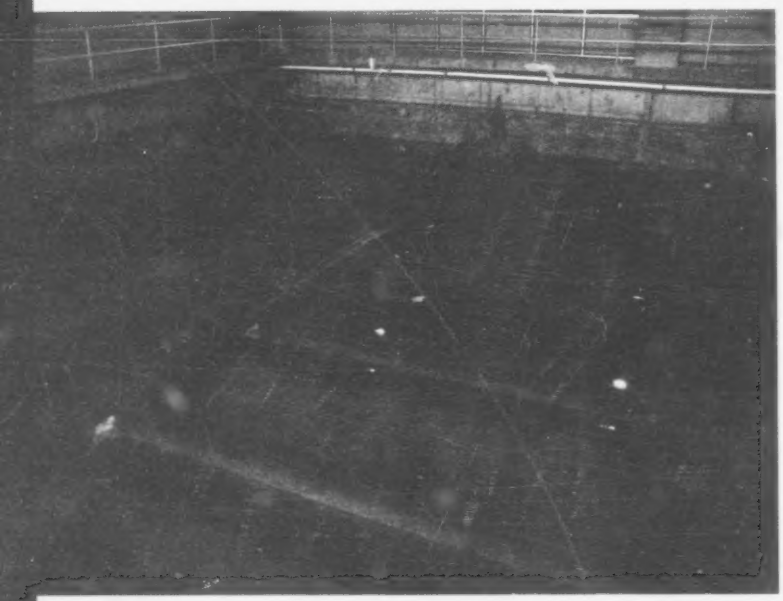
Consommation d'eau des municipalités - L'exposé sur les menaces pour l'approvisionnement en eau des municipalités portera d'abord sur la consommation d'eau de ces dernières et ensuite, sur les questions reliées aux sources, à l'infrastructure pour le traitement et la distribution de l'eau. Cette séquence, fidèle à l'approche à barrières multiples pour la protection de l'eau potable, sera observée dans le présent chapitre.

La consommation d'eau des municipalités correspond à la quantité totale d'eau fournie par le réseau d'aqueduc municipal. Environnement Canada (2002a) classe la consommation d'eau dans les catégories suivantes : résidentielle, commerciale, industrielle et « autre ». La catégorie « autre » englobe les pertes attribuables aux fuites, les utilisations non comptabilisées, notamment pour la lutte contre les incendies et le rinçage des réseaux de distribution, ainsi que les autres utilisations n'ayant pu être classées dans les trois autres catégories. Les meilleurs indicateurs de la consommation d'eau dans les zones urbaines sont les suivants : consommation d'eau d'une municipalité de 638 litres par habitant par jour (moyenne nationale de 1999 pour l'ensemble des secteurs municipaux) et consommation d'eau dans le secteur résidentiel de 343 litres par habitant par jour. Ce dernier indicateur représente plus de la moitié de la consommation d'eau des municipalités au Canada, laquelle varie de 240 à 460 litres par habitant par jour. Les valeurs correspondantes sont très inférieures dans le Nord canadien (Environnement Canada 2002a,c).

Selon l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE, 1999), la consommation par habitant dans le secteur résidentiel au Canada demeure l'une des plus élevée parmi les pays développés (à ce titre, le Canada fait partie d'un groupe comprenant les États-Unis, l'Australie et le Japon). Il convient de noter (figure 1) que la consommation d'eau des municipalités ne représente que 11 % de la consommation totale (prélèvements) canadienne; les autres principaux secteurs d'utilisation sont ceux de l'agriculture, des mines, de la fabrication et de la production de thermoélectricité.

Sources d'approvisionnement en eau des municipalités - Pour choisir une source d'approvisionnement, on doit se baser sur les critères suivants : apport fiable, qualité de l'eau, exigences de collecte (prises d'eau, puits), exigences reliées au traitement de l'eau (élimination des résidus, entre autres) ainsi qu'acquisition et distribution (Hamann et al., 1990). Les plans d'eau et les aquifères servent à alimenter les résidents des villes. Environ 74 % des Canadiens utilisent des eaux superficielles et 26 %, des eaux souterraines (Environnement Canada, 2002b). Dans le cas de plans d'eau et d'aquifères, on peut déterminer les volumes de prélèvement sans danger pour la ressource en se basant sur le niveau des lacs ou des cours d'eau, le niveau des nappes phréatiques, le débit des cours d'eau et la répartition des eaux. Les limites établies obligent les fournisseurs à se tourner vers des sources d'eau moins appropriées (p. ex., dans les prairies, les puits plus profonds peuvent contenir de l'eau fortement minéralisée, p. ex.).

Quant aux sources d'eaux superficielles, elles peuvent être plus éloignées ou de qualité inférieure, ce qui nécessite un traitement de l'eau plus complexe et, par conséquent, occasionne des pertes plus importantes. Il est possible que les perturbations des sources d'eaux superficielles et souterraines entraînent des interruptions de service, lesquelles peuvent souvent être compensées par une gestion proactive axée sur la demande (bulletins, restrictions, prix). Parmi les nouvelles sources d'eau, dont l'importance est relativement secondaire jusqu'à présent, mentionnons : a) l'eau de qualité inférieure à de l'eau potable obtenue par récupération et/ou recyclage des eaux usées et grises; b) l'eau de pluie; c) l'eau potable embouteillée.



Lavage à contre-courant de filtres à sable dans une station d'épuration d'eaux usées

Installations de traitement de l'eau - Il faut recourir à des installations de traitement de l'eau afin de transformer l'eau brute en eau potable. Étant donné l'épuisement des sources d'eau de qualité supérieure, les municipalités ont davantage recours à des sources d'eau de qualité inférieure devant faire l'objet d'un traitement plus important. Cependant, selon les causes de la qualité inférieure de l'eau, cette solution peut accroître les risques pour la santé (confiance accrue dans la technologie et le bon fonctionnement des réseaux d'approvisionnement en eau potable). Des pannes d'équipement et/ou des erreurs d'opérateur peuvent avoir des conséquences graves (O'Connor, 2002).

L'utilisation d'une source d'eau de qualité inférieure présente un autre inconvénient en raison d'une consommation accrue d'eau qui découle du recours à des procédés de traitement plus complexes, à savoir les rejets d'eaux usées et de boues plus importants que ces procédés comportent. Le choix des procédés de traitement de l'eau est fonction des critères suivants : qualité de la source d'eau; qualité requise de l'eau prête au débit; fiabilité de l'équipement de traitement; conditions d'exploitation; qualifications et formation du personnel. Pour faire ce choix, on doit tenir compte de la qualité variable de la source d'eau, des pannes d'équipement, du terrain disponible pour la construction de l'installation de traitement, des exigences reliées à l'élimination des déchets et des coûts (Hamann et al., 1990).

On constate des différences entre les approches de traitement habituelles des eaux superficielles et celles des eaux souterraines. Au nombre des problèmes de qualité liés aux eaux superficielles figurent les concentrations de particules, la couleur, le goût, l'odeur et le contenu microbiologique. Parmi les procédés de traitement couramment appliqués, mentionnons la coagulation, la floculation et la sédimentation, lesquelles sont suivies de la filtration et de la désinfection (Hamann et al., 1990). Les principaux problèmes de qualité associés aux eaux souterraines incluent la dureté élevée ainsi que les teneurs en fer et en manganèse. Les techniques de traitement de l'eau peuvent comporter le traitement à la chaux ou au bicarbonate de soude, la floculation, la filtration et la désinfection.

Réseaux de distribution d'eau - La distribution d'eau englobe l'ensemble de l'infrastructure, de la sortie de la station de traitement de l'eau au robinet. En moyenne, environ 20 % de la consommation quotidienne d'eau des municipalités est principalement attribuée à des pertes en cours de distribution et aux utilisations non comptabilisées. Il est admis que les pertes déclarées sont généralement sous-évaluées et qu'elles augmentent en fonction de l'âge du réseau de distribution. De nombreuses municipalités canadiennes se penchent sur le problème des pertes d'eau, mais dans une mesure différente, allant de la réparation réactive aux pro-

grammes proactifs de gestion des pertes. La consommation non comptabilisée comprend l'eau nécessaire à l'application de diverses mesures opérationnelles, y compris le rinçage des canalisations et des réservoirs pour assurer la qualité de l'eau dans le réseau de distribution. Depuis 2001, on accorde plus d'importance à la sécurité des réservoirs d'eau et des réseaux de distribution, principalement en ce qui a trait à la protection contre les menaces et les accidents divers (EPA, 2002).

Tendances et nouveaux enjeux

Tendances

La présente section porte sur les tendances relatives à la consommation d'eau des municipalités, aux réseaux de distribution, aux installations de traitement et aux sources d'eau municipales.

La hausse soutenue de la population dans les zones urbaines du Canada a influé sur la consommation d'eau. Elle est attribuée à un accroissement général de la population et à une migration des régions rurales vers les zones urbaines. Selon Statistique Canada (2002), la population urbaine totale du Canada est passée de 22,5 millions (1996) à 23,9 millions (2001), ce qui équivaut à 77,9 % de la population totale. On a donc mis en place des services d'approvisionnement en eau pour desservir cette population et donner suite aux pressions exercées par les autorités en matière de santé publique pour amener les municipalités à relier les ensembles résidentiels en place aux réseaux d'aqueduc municipaux. Le principe veut que la gestion de petits réseaux d'aqueduc répartis se révèle plus difficile et peut comporter des risques plus importants pour la sécurité.

Depuis 1989, la consommation moyenne nationale par habitant varie d'une année à l'autre, mais ne change pas considérablement. À l'heure actuelle, on constate une tendance vers l'utilisation de compteurs; le pourcentage total de Canadiens munis de compteurs est passé de 52 % (1991) à 57 % (1999) (Environnement Canada, 2002b). On constate aussi une tendance vers la gestion de la demande au moyen : a) d'instruments économiques (recouvrement intégral des coûts); b) de mesures structurales et opérationnelles (utilisation de compteurs, détection des déchets, utilisation de dispositifs pour diminuer le débit et réduction de la pression); c) d'instruments socio-politiques. Bien qu'il soit difficile de quantifier cette tendance, le nombre croissant d'actions visant à l'établissement d'un prix à partir du coût complet et l'imposition de restrictions d'arrosage plus répandues dans les communautés prouvent indirectement que l'on a de plus en plus recours à la gestion de la demande.

On peut relever plusieurs tendances en ce qui concerne les réseaux de distribution d'eau. Dans l'ensemble, ceux-ci vieillissent et le financement nécessaire à leur réfection se fait rare. On constate une tendance vers une gestion des réseaux de distribution axée sur le rendement, y compris la détection des fuites, la limitation des pertes et l'assurance de la qualité de l'eau (rechloration pour assurer une teneur en chlore résiduel adéquate et contrôler la formation de biofilm, p. ex.). On améliore graduellement l'infrastructure de distribution pour qu'elle réponde aux nouvelles normes de sûreté et de sécurité et parasismiques.

Les tendances concernant les installations de traitement de l'eau révèlent une amélioration continue, qui résulte de normes sur l'eau prête au débit plus strictes et des attentes plus élevées des consommateurs. Or, cette amélioration entraîne une augmentation des coûts pour l'approvisionnement en eau et de la quantité d'eau utilisée dans le procédé de traitement. Parallèlement, le progrès technologique permet le traitement d'eau de mauvaise qualité et, par conséquent, rend possible l'utilisation de nouvelles sources. On doit donc envisager l'utilisation d'une eau provenant d'une source de mauvaise qualité et nécessitant un traitement accru dans le cadre de l'approche à barrières multiples pour la gestion des risques de l'eau potable.

Parmi les tendances concernant les sources d'eau municipales, mentionnons la protection accrue des sources et l'exploitation de nouvelles sources d'importance secondaire. La protection des sources est difficile dans bien des endroits. L'augmentation des utilisations sur place, des déversements de substances toxiques, des risques pour la sécurité et des demandes d'exportation d'eau constituent des menaces pour les sources ou les limitent. L'augmentation des utilisations sur place ou des déversements de substances toxiques restreignent les sources municipales et obligent les fournisseurs à en dénicher de nouvelles qui, la plupart du temps, sont plus éloignées ou de qualité inférieure. L'exploitation de ces sources accroît les coûts pour l'approvisionnement en eau. Dans le même ordre d'idées, les améliorations apportées à leur sécurité et à celle de l'infrastructure de distribution constituent également des coûts supplémentaires.

Le gouvernement fédéral s'oppose au prélèvement d'eau à grande échelle dans les bassins; bon nombre de provinces possèdent, ou s'emploient actuellement à élaborer une législation ou une réglementation à cet égard. Enfin, les enquêtes récentes sur les problèmes d'eau de Walkerton et de North Battleford ont attiré l'attention sur la salubrité de l'eau potable au Canada et sur la nécessité d'appliquer l'approche à barrières multiples pour prévenir la contamination de l'eau potable (O'Connor, 2002). Cette sensibilisation accrue à la protection de l'eau à la source donne lieu à l'établissement de mesures de protection particulières et à la planification plus détaillée de l'approvisionnement en eau.

On constate une tendance à exploiter ou à améliorer certaines nouvelles sources d'eau dont l'importance était

secondaire jusqu'ici. En particulier, on assiste à une hausse de l'utilisation d'eau embouteillée (bouteilles de format régulier ou grands contenants). On assiste également à une hausse de la récupération et du recyclage des eaux usées municipales et industrielles, grises, d'orage et pluviales ainsi qu'à leur réutilisation à des fins d'approvisionnement en eau de qualité inférieure à l'eau potable. Parmi les utilisations courantes, mentionnons l'irrigation à des fins agricoles et d'aménagement paysager, la protection contre les incendies, l'aménagement de paysages aquatiques urbains, divers usages dans des bâtiments, les activités récréatives et l'utilisation industrielle. L'eau récupérée ou recyclée remplace l'eau potable et permet donc de faire des réserves de l'eau de meilleure qualité.

Enfin, on constate une participation accrue du secteur privé aux services d'approvisionnement en eau au Canada. Sont au nombre des avantages souvent rapportés, l'augmentation possible de l'efficacité, l'innovation technologique et une plus grande capacité à réunir des fonds de capital. Les désavantages comprennent la perception que des sources d'eau ou des réseaux d'approvisionnement privés pourraient donner lieu à des injustices concernant le service, la diminution de la disponibilité de la ressource pour les personnes à faible revenu et la perte de contrôle par le secteur public (Lee et al., 2001; Lundqvist et al., 2001).

Nouveaux enjeux

Un certain nombre de questions nouvelles se font jour concernant la consommation d'eau des municipalités, les installations de traitement de l'eau et la protection des sources.

En raison de l'augmentation du coût de l'eau et de l'utilisation de compteurs d'eau, on prévoit une baisse de la consommation. En général, une qualité d'eau supérieure, le renouvellement de l'infrastructure, l'accroissement de la sécurité et le recouvrement intégral des coûts justifient la hausse des prix. Il existe diverses définitions du recouvrement intégral des coûts mais, habituellement, il comprend le coût des investissements, les coûts d'exploitation et d'entretien et les amortissements cumulés. On constate une sensibilisation accrue à l'eau « virtuelle » (eau incorporée dans des produits tels les aliments en conserve ou transformés, par exemple). Ce type d'utilisation fait concurrence à d'autres types d'utilisation dans les zones urbaines. Auparavant, la désinfection des eaux souterraines n'était pas nécessaire, mais il se peut qu'elle s'impose dorénavant.

L'alimentation des aquifères et le stockage d'eau pour palier les pointes de consommation peuvent contribuer à une augmentation des sources d'eau. On s'attend à ce que les changements climatiques aient une incidence sur les sources d'eau, notamment dans le sud du Canada. Parmi les répercussions prévues, mentionnons la réduction des débits et des niveaux des lacs et des cours d'eau, la diminution des niveaux des eaux souterraines et l'élévation de la température de l'eau. On prévoit des changements importants sur le plan de l'emmagasinement de l'eau dans les glaciers et la neige qui auront des répercussions sur l'approvisionnement en eau. D'une manière générale, on s'attend à ce que l'eau soit de qualité inférieure et qu'elle renferme une concentration plus élevée de matières en suspension (attribuable à des tempêtes violentes plus fréquentes), à ce que la consommation d'eau augmente par suite du réchauffement de l'air et à des répercussions sur la distribution de l'eau (si l'eau réchauffe, la réapparition de bactéries est possible). La sensibilisation de la population à des pénuries éventuelles devrait favoriser une utilisation plus efficace de l'eau.

Enfin, on a aussi dégagé deux questions socio-politiques, à savoir que la mondialisation influe sur l'approvisionnement en eau de manière favorable (nouvelle technologie et augmentation des échanges commerciaux) et défavorable (pression accrue pour l'exportation de l'eau canadienne). On ne peut plus percevoir l'eau comme un produit; la population canadienne reconnaît davantage la dimension éthique de l'approvisionnement en eau.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Les points suivants correspondent aux besoins en matière de connaissances et de programmes. Ils couvrent l'ensemble des aspects de l'approvisionnement en eau des municipalités : consommation, distribution, traitement et sources.

Consommation d'eau dans les municipalités

- Sensibiliser davantage le public à une utilisation de l'eau plus efficace et à une réduction de la consommation.
- Gestion axée sur la demande - élaborer une base de données consultable des meilleures pratiques, des dispositifs économiseurs d'eau (pour une utilisation judicieuse de l'eau) et des instruments réglementaires/économiques/sociaux pour encourager les résidents urbains à adopter de telles pratiques, à l'appui du développement durable. On trouve l'exemple du programme de la ville de Barrie, en Ontario, sur le site Web de l'EPA (http://www.epa.gov/OW-OWM.html/water-efficiency/utilityconservation.pdf).
- Mieux comprendre les diverses utilisations (essentielles et non essentielles ainsi que les impacts environnementaux connexes) et les facteurs qui les dictent.
- Recueillir des données temporelles et spatiales sur les utilisations pour déterminer la consommation des divers secteurs, les pertes, les utilisations non comptabilisées, les écarts régionaux et les tendances.

- Recueillir des données sur l'incidence de la température/de la saison sur la consommation d'eau.

Réseaux de distribution d'eau

- Mieux comprendre les écarts de la demande - consommations de pointe et courante.
- Évaluer l'état/la capacité des réseaux de distribution et les installations de traitement en place.
- Élaborer des mesures institutionnelles/des politiques/des mécanismes financiers pour le remplacement opportun de l'infrastructure vieillissante d'approvisionnement en eau.

Installation de traitement de l'eau

- Régler la question de la présence éventuelle de nouveaux produits chimiques dangereux (perturbateurs endocriniens, produits pharmaceutiques et thérapeutiques) dans les sources et de leur élimination par traitement.
- Élaborer des nouveaux procédés de récupération ou de recyclage des eaux usées, grises, pluviales, pluviales d'orage et de procédé.

Sources d'approvisionnement en eau des municipalités

- Concevoir des plans de gestion intégrée de l'eau assurant la protection des sources d'eau potable. Une nouvelle législation peut se révéler nécessaire pour éliminer les obstacles à la conception et à l'application de ces plans.

Références

American Rivers. 2002. « Paving our way to water shortages: how sprawl aggravates drought ». Disponible à l'adresse Web www.amrivers.org. Site visité le 14 août 2003.

Chambers, P.A., M. Allard, S.L. Walker, J. Marsalek, J. Lawrence, M. Servos, J. Busnarda, K.S. Munger, K. Adare, C. Jefferson, R.A. Kent et M.P. Wong. 1997. « Impacts of municipal wastewater effluents on Canadian waters: a review ». Water Qual. Res. J. Canada 32: 659-713.

Environnement Canada. 2001. Menaces pour les sources d'eau potable et les écosystèmes au Canada. Institut national de recherche sur les eaux, Burlington (Ontario). Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE; rapport no 1.

Environnement Canada. 2002a. Affaires économiques et réglementaires. Tarification municipale de l'eau 1991-1999. Disponible à l'adresse Web : http://www.ec.gc.ca/erad/dwnld_html/waterreportbw_f.htm. Site visité le 6 novembre 2003.

Environnement Canada. 2002b. L'eau en milieu urbain : Consommation d'eau et traitement des eaux usées par les municipalités. Disponible à l'adresse Web :

http://www.ec.gc.ca/soer-ree/Francais/Indicators/Issues/Urb_H2O/default.cfm. Site visité le 6 novembre 2003.

Environnement Canada. 2002c. Site Web sur l'eau douce. La gestion de l'eau. L'utilisation de l'eau. Disponible à l'adresse Web :

http://www.ec.gc.ca/water/fr/manage/use/f_use.htm. Site visité le 6 novembre 2003.

Hamann, C.L., J.B. McEwen et A.G. Myers. 1990. « Guide to selection of water treatment processes », p. 157-187. *Dans* F.W. Pontius (s. la dir. de), « Water quality and treatment ». AWWA, McGraw-Hill, Inc., Toronto.

Lee, T., J.-L. Oliver, P.-F. Ténière-Buchot, L. Travers et F. Valiron. 2001. « Economic and financial aspects », p. 313-343, chapitre 7. *Dans* C. Maksimovic et J.A. Tejada-Guibert (s. la dir. de), « Frontiers in urban water management: deadlock or hope? » IWA Publishing, Londres, Royaume-Uni.

Lijklema, L., J.M. Tyson et A. Lesouf. 1993. « Interactions between sewers, treatment plants and receiving waters in urban areas: a summary of the INTERURBA '92 workshop conclusions ». Water Sci. Technol. 27(12): 1-29.

Lundqvist, J., S. Narain et A. Turton. 2001. « Social, institutional and regulatory issues », p. 344-398, chapitre 8. *Dans* C. Maksimovic et J.A. Tejada-Guibert (s. la dir. de), « Frontiers in urban water management: deadlock or hope? » IWA Publishing, Londres, Royaume-Uni.

Marsalek, J., M. Diamond, S. Kok et W.E. Watt. 2001. Eaux de ruissellement urbaines, p. 53-58, chapitre 11. *Dans* Menaces pour les sources d'eau potable et les écosystèmes au Canada. Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington (Ontario). Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE; rapport no 1.

OCDE. 1999. Le prix de l'eau : les tendances dans les pays de l'OCDE. OCDE, Paris.

O'Connor, D. 2002. Partie II. Rapport de la Commission d'enquête sur Walkerton : stratégie pour la salubrité de l'eau potable. Disponible de : http://www.attorneygeneral.jus.gov.on.ca/french/about/pubs/walkerton/part2/. Site visité le 14 août 2003.

Statistique Canada. 2002. Recensement 2001 : Produits de données normalises : Chiffres de population et des logements : Régions urbaines et rurales. Disponible de : http://www12.statcan.ca/francais/census01/products/standard/pop-dwell/Table-UR-PS.cfm. Site visité le 14 août 2003.

Sullivan, C. 2002. « Calculating a water poverty index ». World Development 30(7): 1195-1210.

U.S. EPA. 2002. « Water infrastructure security ». Disponible à l'adresse Web :

http://www.epa.gov/safewater/security/. Site visité le 14 août 2003.

Chapitre 6

DEMANDES DE L'INDUSTRIE MANUFACTURIERE ET DES CENTRALES THERMIQUES

Karl Schaefer[1], Donald Tate[2], Steven Renzetti[3] et Chandra Madramootoo[4]

[1] Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington (Ont.)

[2] GeoEconomics Associates Inc., Kanata (Ont.)

[3] Université Brock, département d'économie, St. Catharines (Ont.)

[4] Université McGill, département de génie agricole et des biosystèmes, Sainte-Anne-de-Bellevue (Qc)

Situation actuelle

L'eau occupe une place importante dans les procédés de fabrication. L'industrie ne pourrait pas fonctionner si elle ne disposait pas d'eau pour utiliser ces procédés ainsi que pour le refroidissement, la condensation, la production de vapeur et l'évacuation des déchets. En conséquence, au Canada comme dans beaucoup de pays industrialisés, les fabricants emploient de grandes quantités d'eau. Au chapitre des prélèvements totaux, les centrales thermiques viennent au premier rang; en 1996, dernière année pour laquelle des estimations nationales sont disponibles, leurs prélèvements s'établissaient à environ 28 750 millions de mètres cubes (Mm^3) (Environnement Canada, 2002). L'industrie manufacturière canadienne vient ensuite, avec des prélèvements d'un peu plus de 6 000 Mm^3 pour cette même année (Environnement Canada, 2002). En comparaison, les prélèvements dans d'autres secteurs pour l'année 1991 ont totalisé 5 100 Mm^3 (utilisations urbaines), 4 000 Mm^3 (agriculture) et 364 Mm^3 (exploitation minière) (Statistique Canada, 2000). Le présent chapitre traite de questions entourant l'utilisation d'eau au Canada par l'industrie manufacturière et les centrales thermiques (principalement les centrales nucléaires et au charbon); les secteurs de l'exploitation minière, y compris l'industrie pétrolière, et de la production hydroélectrique seront abordés dans d'autres chapitres.

Avec des prélèvements aussi élevés, l'industrie manufacturière canadienne peut avoir une incidence considérable sur la disponibilité de l'eau, notamment si l'on tient compte des utilisations concurrentes (utilisations sur place et autres utilisations de consommation). Certaines industries manufacturières, particulièrement l'industrie des pâtes et papiers ainsi que les industries chimique et métallurgique, utilisent de grandes quantités d'eau douce et, par conséquent, évacuent d'importantes quantités de déchets. Ces eaux usées sont souvent rejetées dans certains des cours d'eau et des lacs les plus importants du Canada eu égard aux habitats et à d'autres utilisations par l'homme et peuvent entraîner une dégradation importante de l'environnement, en plus de limiter la disponibilité de l'eau pour les utilisateurs en aval.

Il est intéressant de constater que les usines sont souvent à la fois la cause primaire et les victimes d'une réduction de la quantité d'eau disponible. L'épuisement de la ressource a provoqué une augmentation des coûts de l'approvisionnement industriel en eau, en plus d'obliger les services d'aqueducs publics à trouver de nouvelles sources d'approvisionnement, pour ne citer que cet exemple. Dans le cadre d'une étude de fiabilité du Metropolitan Water District en Californie, les chercheurs ont évalués quels seraient les coûts d'une pénurie d'eau pour les utilisateurs. Selon eux, une pénurie de 15 % touchant les industries consommatrices d'eau du sud de la Californie pourrait entraîner des pertes d'emploi et de production équivalant à environ 3,5 à 4,0 milliards de dollars (Rodrigo et al., 1996).

Utilisation de l'eau dans le secteur manufacturier[1]

Prélèvements. À l'échelle nationale, les prélèvements d'eau totaux ont diminué depuis 1981. Les industries du papier et des produits connexes, des métaux primaires et des produits chimiques étaient responsables de 82 % des prélèvements d'eau totaux en 1996 (tableau 1). En 1996, les usines de l'Ontario enregistraient la moitié des prélèvements d'eau totaux du secteur manufacturier du Canada, suivies de celles du Québec et de la Colombie-Britannique.

Rapport entre les prélèvements et la production. Au cours des deux dernières décennies, les prélèvements d'eau ont connu une diminution par rapport à la production manufacturière réelle. Cette situation résulterait des modifications apportées aux règlements en matière d'environnement, des changements technologiques survenus ou des variations du coût des autres intrants. Par exemple, la réglementation sur la qualité de l'eau a entraîné une baisse des rejets d'eau par les industries et, conséquemment, des prélèvements. De même, les efforts des entreprises pour économiser l'énergie et les matières premières ont entraîné dans certains cas une chute des prélèvements d'eau (Renzetti, 2003). Il semble

que cette diminution ne soit pas attribuable aux augmentations du prix de l'eau, puisque la plupart des usines possèdent leur propre réseau d'approvisionnement.

Sources d'eau. Le secteur manufacturier assure lui-même 82 % de son approvisionnement en eau en prélevant directement des eaux douces de surface, situation qui est demeurée plus ou moins inchangée depuis 1991. Le reste de l'approvisionnement de ce secteur, soit 18 %, est réparti entre les services publics (9 %), les eaux souterraines (3 %), les autres sources d'eau douce (3 %) et les eaux saumâtres (principalement les eaux de marée) (3 %). Les groupes industriels composés en majorité d'établissements relativement petits tendent à s'approvisionner principalement auprès des services publics, alors que les plus grandes industries (p. ex., papier et produits connexes, métaux primaires, produits chimiques, produits du pétrole et du charbon) s'approvisionnent généralement à partir de sources d'eau douce privées.

But de l'utilisation de l'eau. Dans l'ensemble, les usines emploient 49 % du total prélevé pour la fabrication et 47 % pour le refroidissement, la condensation et la production de vapeur, bien qu'il y ait des différences dans nombre de secteurs (p. ex., l'eau de fabrication représente plus de 75 % du total prélevé dans le secteur du papier et des produits connexes). L'eau utilisée pour les services sanitaires représente un très faible pourcentage (2 %) du total.

Réutilisation de l'eau. Bien que les taux de réutilisation de l'eau varient de manière significative entre les secteurs industriels, dans l'ensemble, ils ont connu une légère augmentation depuis 1991, renversant ainsi la tendance observée de 1986 à 1991 où ils étaient en baisse. Les taux de réutilisation les plus élevés ont été affichés par les industries des plastiques, du matériel de transport, du pétrole et du charbon, du papier et des produits connexes, des produits chimiques, du caoutchouc et des métaux primaires. Les taux de réutilisation les plus faibles ont été observés dans les secteurs des produits du bois, des boissons, des produits métalliques fabriqués, des aliments et des textiles (tableau 1). La tendance à la hausse que l'on a observée récemment relativement à la réutilisation de l'eau en général constitue un progrès, difficile à expli-

Tableau 1. Certaines caractéristiques de l'utilisation de l'eau par l'industrie manufacturière et les centrales thermiques (Mm^3/an), par paramètre d'utilisation de l'eau et groupe industriel, 1996

Groupe industriel	Prélèvement	Recyclage	Utilisation brute d'eau	Taux d'utilisation (%)	Rejet	Consommation (Taux de consommation en %)
Aliments	269,5	145,3	414,9	154	240,0	29,5 (10,9)
Boissons	73,1	18,3	91,4	125	56,2	16,9 (23,1)
Produits en caoutchouc	12,3	12,9	25,2	205	11,3	1,0 (7,8)
Produits en plastique	13,3	38,7	52,0	392	12,0	1,3 (9,4)
Textiles primaires	86,7	68,2	154,9	179	84,6	2,1 (2,4)
Produits textiles	15,0	7,9	23,0	153	12,9	2,1 (14,1)
Produits du bois	45,1	10,2	55,3	122	33,0	12,1 (26,9)
Papier et produits connexes	2421,3	3105,9	5527,3	228	2207,0	214,3 (8,9)
Métaux primaires	1423,0	1447,9	2870,9	202	1303,0	120,0 (8,4)
Produits métalliques fabriqués	19,4	8,1	27,5	142	18,4	1,1 (5,6)
Matériel de transport	65,4	107,3	172,7	264	46,4	19,0 (29,0)
Produits minéraux non métalliques	102,3	91,8	194,1	190	83,1	19,2 (18,7)
Produits du pétrole et du charbon	370,5	541,4	911,9	246	348,0	22,5 (6,1)
Produits chimiques et connexes	1121,3	1353,7	2475,0	221	1030,6	90,7 (8,1)
Total (manufactures)	6038.3	6957.7	12,996.0	215	5486,7	551,6
Total (production d'énergie thermique)	28 749	11 655	40 404	140	28 241	508 (1,8)

Taux d'utilisation = Utilisation brute d'eau en % des prélèvement s (plus le nombre est élevé, plus le taux de réutilisationest important)
Consommation = Prélèvement – rejet
Taux de consommation (%) = Consommation d'eau en % des prélèvements

quer cependant. Comme on l'a mentionné précédemment, les règlements en matière d'environnement, les changements technologiques et les variations du coût des autres intrants semblent être des facteurs clés et ces derniers varient en fonction du secteur et, dans bien des cas, des installations considérés. En conséquence, l'estimation des futures tendances en matière de réutilisation pose un problème.

Rejets d'eaux usées. Les rejets totaux d'eaux usées sont en baisse depuis 1991; 70 % de ces eaux sont rejetées dans les eaux de surface privées, 16 % dans les eaux de marée, 14 % dans les égouts publics et moins de 1 % dans les eaux souterraines.

Consommation d'eau (prélèvements-rejets : renvoie ici à l'eau qui n'est pas retournée à sa source d'origine, c.-à-d., la vapeur non contenue ou l'eau incorporée à un produit final). À l'échelle nationale, la consommation d'eau représentait, en 1996, 9 % des prélèvements totaux, comparativement à 7 % en 1991. Les taux de consommation les plus élevés ont été observés dans les secteurs des boissons, des produits du bois et du matériel de transport (tableau 1). En général, les taux d'utilisation et de consommation de l'eau dans les provinces de l'Atlantique comptaient parmi les plus bas au Canada, en raison de la disponibilité de l'eau et du type d'industries qu'on y retrouve. Les taux d'utilisation pour les provinces des Prairies (Saskatchewan et Alberta en particulier) étaient sensiblement plus élevés que ceux du reste du Canada. Cette situation s'explique par le fait que les usines doivent accroître le recyclage de l'eau, notamment en raison du climat semi-aride qui demande des efforts accrus de conservation de l'eau.

Utilisation de l'eau par les centrales thermiques.

Les prélèvements attribuables aux centrales thermiques (principalement les centrales nucléaires et au charbon) ont totalisé 28 750 Mm^3 en 1996 (tableau 1). Les eaux de surface constituent la source principale de prélèvement et le principal point de rejet pour ce secteur. Les taux de réutilisation ont connu une augmentation significative entre 1991 et 1996, augmentation qui pourrait être attribuable au renforcement des règlements ou de l'éthique environnementale. L'utilisation de l'eau par les centrales thermiques était concentrée dans les régions qui présentaient les plus hauts taux de recyclage et les plus grands établissements, soit l'Ontario et les provinces des Prairies.

En résumé, les observations principales qui suivent caractérisent l'utilisation de l'eau par l'industrie manufacturière et les centrales thermiques au Canada.

- Si on mesure l'utilisation de l'eau en fonction des prélèvements totaux, les centrales thermiques et l'industrie manufacturière constituent respectivement les premier et deuxième grands utilisateurs d'eau au Canada.
- L'approvisionnement est assuré principalement à partir de réseaux privés d'eau douce de surface. C'est particulièrement le cas pour les grands utilisateurs. Les plus petits établissements, qui constituent de loin la majorité des établissements manufacturiers au Canada, s'approvisionnent principalement auprès des services publics, en grande partie parce que les économies d'échelle ne justifient pas la construction d'installations d'approvisionnement en eau privées.
- Le secteur manufacturier, dans l'ensemble, présente les taux de réutilisation de l'eau les plus élevés par rapport aux autres consommateurs (centrales thermiques, municipalités, agriculture et industrie minière).
- En conséquence, si on mesure l'utilisation de l'eau en fonction de la consommation (l'eau qui n'est pas retournée à sa source d'origine), les centrales thermiques et l'industrie manufacturière sont moins susceptibles d'influer sur la disponibilité de l'eau que les municipalités et l'agriculture, bien que cette situation puisse être différente dans beaucoup de régions.

Tendances

Demande future

Malgré les efforts déployés dans le passé pour déterminer l'évolution de la demande industrielle en eau (p. ex., Tate, 1985; Tate et Harris, 1999, 2002), la « science » de la prévision de la demande en eau demeure très incertaine. L'eau est fondamentalement une « demande dérivée »; elle est par conséquent fonction de nombreuses autres variables, comme les niveaux de population, la production industrielle, les règlements en matière de répartition de l'eau (y compris la tarification de l'eau) et les conditions technologiques. Puisque toutes ces variables sont elles-mêmes incertaines quant à leur valeur future, les niveaux de la demande en eau le sont davantage. Malgré le nombre limité de recherches réalisées dans le passé (voir Renzetti, 2002, pour une vue d'ensemble de ces études), ce « facteur d'incertitude » est encore dominant, ce qui rend les projections de la demande en eau plutôt hypothétiques et a pour effet d'accroître l'incertitude à mesure que l'« horizon temporel » s'agrandit.

Pour pallier partiellement cette incertitude, on peut établir une gamme de conditions futures possibles et faire de la demande une fonction de ces conditions. C'est cette méthode que l'on utilise principalement au Canada pour produire des prévisions de la demande en eau à l'échelle nationale – la dernière a été réalisée en 1985 dans le cadre de l'Enquête sur la politique fédérale relative aux eaux (Tate, 1985)[2]. Cependant, même l'utilisation de l'analyse de sensibilité peut être trompeuse. D'après l'étude susmentionnée, les prélèvements en eau par le secteur manufacturier devraient varier entre un

état relativement stable (selon le scénario prudent) et une augmentation allant jusqu'à plus du triple (selon le scénario de forte croissance) entre les années 1981 et 2011. Toutefois, les données disponibles indiquent que ces prélèvements ont chuté entre 1986 et 1996 (Environnement Canada, 2002).

Des projections régionales concernant l'utilisation de l'eau dans le secteur manufacturier ont aussi été réalisées en Ontario (Tate et Harris, 1999, 2002) dans le cadre d'une initiative Canada-Ontario-États-Unis dont le but était d'acquérir les renseignements de base nécessaires pour améliorer les décisions relatives à la répartition de l'eau à l'échelle des sous-bassins et à mieux évaluer les répercussions des changements climatiques[3]. Les projections relatives à l'utilisation de l'eau sont toujours limitées par une image statique de l'économie, ce qui les rend très incertaines et complique également l'évaluation des répercussions sur la disponibilité de l'eau.

Facteurs déterminants de l'utilisation industrielle de l'eau

D'après le peu de recherches disponibles, les frais externes, le niveau de production, l'avancement de la technologie, les règlements en matière d'environnement et les coûts des autres intrants sont tous des facteurs qui entrent en ligne de compte pour la détermination des niveaux de prélèvement de l'eau. Par exemple, Dupont et Renzetti (2001) ont constaté que, pour l'ensemble du secteur manufacturier canadien, les taux de prélèvement et de recyclage étaient tous deux sensibles à leurs prix unitaires correspondants respectifs, avec des élasticités par rapport au prix (c.-à.-d., le degré de sensibilité de la demande en eau à la fluctuation des prix) estimées à -0,8 et -0,7, respectivement (Dupont et Renzetti, 2001; Renzetti, 1992).

Le secteur canadien du papier et des activités connexes utilise et recycle d'énormes quantités d'eau.

La compréhension des facteurs déterminants de l'utilisation industrielle de l'eau peut aider à expliquer les tendances récentes et à prévoir les variations futures. Par exemple, la quantité d'eau prélevée a connu une diminution par rapport à la production au cours de la période 1981-1996. Cependant, puisque la majeure partie des prélèvements du secteur manufacturier n'a pas subi de hausse de prix (la plupart des industries de ce secteur possèdent leur propre système d'approvisionnement), il faut chercher d'autres explications. Il est intéressant de noter que Dupont et Renzetti (2001) ont constaté que l'évolution technologique au cours de la période 1981-1991 a mené à une augmentation du prélèvement de l'eau et à une diminution de la réutilisation. Étant donné que l'eau ne représente qu'une infime partie des coûts de production, il est probable que cette situation résulte des efforts des entreprises visant à économiser sur les intrants intermédiaires et l'énergie utilisée plutôt qu'à augmenter purement et simplement leur utilisation de l'eau. Par contre, des recherches effectuées ailleurs indiquent que le renforcement des règlements concernant les rejets admissibles dans les effluents semble avoir entraîné une diminution du prélèvement de l'eau et une augmentation de la réutilisation interne (Solley et al., 1999). Toutefois, un certain nombre de questions importantes, telles les décisions relatives au recyclage, demeurent peu connues.

Répercussions sur la disponibilité de l'eau

Pressions du secteur. Comme l'économie du pays continue à s'orienter vers des secteurs de fabrication basés sur le savoir (p. ex., les ordinateurs et l'électronique, la biotechnologie et les produits pharmaceutiques) et des industries axées sur les services, on observera probablement une demande d'eau de meilleure qualité; par conséquent, ces industries pourraient investir des sommes considérables dans leurs usines pour produire de l'eau ultrapure. De plus, on pourrait s'attendre à ce que la demande en eau passe d'un nombre restreint de grands utilisateurs industriels qui utilisent leurs propres sources d'approvisionnement à un nombre croissant de plus petits fabricants dont l'approvisionnement est plus tributaire des réseaux municipaux. Or, cette situation constitue une menace réelle pour l'industrie canadienne étant donné la détérioration des installations municipales de distribution d'eau documentée au cours des deux dernières décennies (FCM, 1985; NRTEE, 1996). Cependant, au delà de cette spéculation, il existe peu d'analyses documentées des répercussions de ce changement d'orientation sur la disponibilité de l'eau.

Impacts à l'échelle régionale. Les principales industries consommatrices d'eau et les plus importants prélèvements se trouvent encore dans le bassin dans Grands Lacs et du Saint-Laurent. Des questions importantes sont soulevées relativement à la qualité de l'eau, en raison de la contamination par des sources municipales et

industrielles ponctuelles et des sources agricoles diffuses. Bien que la pollution par des sources ponctuelles et diffuses se produise aussi dans les autres bassins du Canada, son ampleur n'est pas aussi considérable que dans ce bassin. Il est intéressant de constater que les usines sont souvent à la fois la cause primaire et les victimes d'une réduction de la quantité d'eau disponible. L'épuisement de la ressource a provoqué une augmentation des coûts de l'approvisionnement industriel en eau, en plus d'obliger les services d'aqueducs publics à trouver de nouvelles sources d'approvisionnement, pour ne citer que cet exemple.

Impacts sur les plus petits bassins hydrographiques. Les prélèvements du secteur manufacturier dans les tributaires et les cours d'eau plus petits pourraient avoir des impacts écologiques plus graves. Les caractéristiques hydrologiques des petits cours d'eau sont telles qu'il existe de grandes fluctuations de débits entre la période de fonte des neiges au printemps et la période estivale. Les faibles débits d'été sont assez critiques, puisqu'il peut arriver que la quantité d'eau disponible ne soit pas suffisante pour répondre aux demandes de tous les secteurs économiques. Qui plus est, il faut tout d'abord combler les utilisations sur place avant d'envisager d'effectuer d'autres prélèvements. Au Canada, certains gouvernements provinciaux (p. ex., ceux de l'Alberta, de l'Ontario et du Québec) ont répondu à ce besoin en réévaluant leurs règlements régissant la délivrance des permis de prélèvement.

Impacts saisonniers. Les prélèvements des usines représentent généralement une moins grande menace pendant les périodes de faible débit. Hormis l'industrie agro-alimentaire, l'utilisation de l'eau dans le secteur manufacturier est en grande partie constante tout au long de l'année. L'utilisation de l'eau par les municipalités, par contre, connaît habituellement une pointe quotidienne et présente un taux de prélèvement estival pouvant être deux à trois fois plus élevé que le débit moyen annuel.

Impacts sur les infrastructures. D'après l'expérience acquise dans les stations de traitement d'eau municipales, les moules zébrées sont susceptibles d'obstruer les prises d'eau des installations industrielles. De plus, les émissaires ou les effluents d'eaux usées des industries pourraient constituer un problème, puisqu'ils sont susceptibles de soulever les sédiments des lits des chenaux et des lacs. La remise en suspension de sédiments chargés de substances chimiques peut aussi réduire la qualité de l'eau. Jay et Simenstad (1996) ont constaté que les prélèvements d'eau peuvent affecter les habitats aquatiques en aval et les régimes fluviaux des écosystèmes fragiles. Des préoccupations semblables ont été exprimées par Boyce et al. (1993) au sujet des effets des prélèvements d'eau et des rejets des installations de refroidissement industrielles et municipales.

Recyclage et qualité de l'eau. On observe une lente augmentation du recyclage de l'eau par les usines. Bien que la diminution des prélèvements d'eau douce soit bénéfique, l'augmentation des taux de recyclage dans les procédés industriels peut produire des concentrations plus élevées de polluants, qui seront par la suite rejetés dans les eaux réceptrices. Cela pourrait influer sur la disponibilité de l'eau douce pour d'autres utilisations en aval.

Nouveaux enjeux

Déréglementation du marché de l'électricité. La déréglementation du marché de la production et de la vente d'électricité pourrait avoir une incidence considérable sur l'utilisation de l'eau au Canada, et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, les centrales thermiques et hydroélectriques emploient d'énormes quantités d'eau. Deuxièmement, les changements touchant le marché de l'électricité peuvent modifier au plan temporel le régime de prélèvement par les centrales, c'est-à-dire que des changements touchant les conditions du marché de l'électricité pourraient obliger les centrales qui étaient utilisées principalement pour la production en charge de base à passer à une production en charge de pointe (et inversement). Troisièmement, selon les coûts de production relatifs, des changements importants pourraient survenir en ce qui a trait aux objectifs de production de différentes centrales, ce qui entraînera des augmentations du volume de production pour certaines et des diminutions, voire des arrêts de production, pour d'autres. Finalement, les pressions découlant de la mise en application du Protocole de Kyoto et des facteurs externes associés à l'exploitation de centrales au charbon pourraient entraîner, à long terme, un délaissement des centrales thermiques au profit des centrales hydroélectriques. Tous ces facteurs et leurs répercussions sur l'utilisation industrielle de l'eau au Canada ne sont pas bien compris, mais pourraient revêtir une certaine importance à l'échelle locale et nationale.

Effets des changements climatiques. Peu de recherches ont été réalisées concernant les effets des changements climatiques sur l'industrie et les conséquences relatives à l'utilisation de l'eau. L'augmentation des températures ambiantes entraîne un accroissement des besoins de refroidissement dans les installations industrielles et, par conséquent, une augmentation de la demande en eau, en particulier pendant la saison estivale. Cette demande accrue peut conduire à un accroissement de la concurrence entre les secteurs pour les ressources en eau disponibles. Si les changements climatiques entraînent une diminution des débits ou des niveaux d'eau, ces problèmes pourraient s'aggraver. Dans l'ensemble, la prévision des impacts sur ce secteur est extrêmement difficile, puisque les changements climatiques eux-mêmes influeront sur la demande pour certains produits, ce qui aura pour effet de modifier les besoins en eau des fabricants touchés. On sait que les changements climatiques

influeront à la fois sur la demande d'eau et l'approvisionnement en eau, ce qui accroît par conséquent la nécessité d'avoir des institutions et des règlements suffisamment souples et plus efficaces pour assurer la répartition de l'eau.

Industrie de l'eau embouteillée. L'industrie canadienne de l'eau embouteillée a connu une croissance rapide au cours des dernières années. La production a maintenu un taux d'augmentation annuel de 9 % depuis 1995. Toutefois, par rapport à la situation dans le reste du monde, les Canadiens boivent relativement peu d'eau embouteillée. Le Canadien moyen en buvait approximativement 20 litres en 1997, alors que le niveau de consommation moyen par habitant en Europe se situait entre 100 et 140 litres. De plus, l'industrie de l'eau embouteillée est encore relativement petite, avec une production annuelle totale en 2000 inférieure à 1 million de mètres cubes (Dupont et al., 2002). En conséquence, cette industrie ne constitue pas un utilisateur d'eau important dans le secteur manufacturier; cependant, elle devrait faire l'objet d'un suivi en raison de sa croissance rapide et des effets localisés qu'elle pourrait avoir sur les aquifères.

Industries de la « nouvelle économie ». La détérioration de la qualité de l'eau peut entraîner une augmentation considérable des coûts du traitement de l'eau pour certaines industries. Nombre d'entre elles ont besoin d'une eau de haute qualité, même pour le refroidissement. Les industries dites « de la nouvelle économie » (p. ex., les fabricants de puces d'ordinateurs) ont besoin d'une eau ultrapure pour leurs opérations de fabrication. Ainsi, les problèmes de dégradation de la qualité de l'eau, souvent causés par le secteur industriel, constituent une menace pour les autres industries et, d'un point de vue plus général, pour la population ainsi que les écosystèmes. Par ailleurs, les impacts sur l'approvisionnement en eau des secteurs tertiaires en croissance au Canada, par exemple l'incidence locale de grands hôtels dans les régions éloignées, demeurent peu étudiés.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Lacunes relatives aux connaissances et à la recherche

Données. Des données sur les prélèvements, la consommation, le recyclage, etc., de l'eau sont nécessaires si l'on veut connaître avec précision la quantité d'eau douce utilisée par les industries, en particulier au niveau des bassins et des sous-bassins hydrographiques. Il faut donc que les études nationales sur l'utilisation de l'eau dans l'industrie soient poursuivies.

Modèles. Afin de réduire les risques de conflits entre les divers utilisateurs d'eau, en particulier pendant les périodes de sécheresse et de faible débit, il est nécessaire d'élaborer des modèles biophysiques de répartition de l'eau qui tiennent compte des besoins des écosystèmes. Il faut favoriser la mise sur pied d'initiatives comme celles qui sont en cours dans le bassin des Grands Lacs pour réunir les renseignements de base nécessaires à la prise de meilleures décisions sur la répartition de l'eau des sous-bassins. La recherche sur les besoins écologiques en eau est par conséquent importante. Il faut aussi élaborer des modèles économétriques qui nous permettront de mieux expliquer les décisions relatives au recyclage et la demande en eau des industries.

Surveillance. Il faut surveiller et évaluer les effets du rejet d'eaux usées par les grandes industries sur la disponibilité de l'eau en aval et renforcer la surveillance de la qualité des effluents. De plus, la qualité des effluents des usines qui utilisent des quantités importantes d'eau recyclée devrait faire l'objet d'une surveillance continue pour que l'on puisse établir des liens entre la quantité d'eau recyclée et la qualité de cette eau. Les résultats d'un tel programme de surveillance permettront de déterminer si des mesures particulières doivent être mises en place pour la gestion de l'eau recyclée concentrée ou polluée.

Développement technologique. Il faut favoriser de façon soutenue la mise au point de techniques de conservation de l'eau et de procédés de fabrication permettant d'économiser l'eau.

Cartographie des écosystèmes fragiles. Nous devons mieux comprendre, connaître et cartographier les écosystèmes aquatiques vulnérables des régions où il se trouve de grands utilisateurs d'eau industriels. Nous pourrons ainsi déterminer si les organismes aquatiques sont susceptibles de subir des modifications à la suite du prélèvement d'eau douce et du rejet d'eaux usées dans les milieux aquatiques et, le cas échéant, d'évaluer la nature de ces changements – ce qui constitue une priorité selon une étude des incidences écologiques des prélèvements d'eau dans les Grands Lacs (Limno-Tech, Inc., 2002).

Compréhension de l'utilisation industrielle de l'eau. On possède peu de renseignements sur un certain nombre de caractéristiques de l'utilisation industrielle de l'eau, notamment les facteurs influençant la prise de décisions sur la réutilisation, la relation entre l'eau et les autres intrants, l'interaction entre les décisions des entreprises concernant le prélèvement d'eau et la qualité de l'eau ainsi que la valeur des autres applications industrielles possibles de l'eau.

Besoins en matière de programmes

Tarification de l'eau. Au Canada, la plupart des provinces n'imposent pas de frais pour les prélèvements d'eau aux secteurs qui consomment cette ressource. Le fait que l'on perçoive encore le Canada comme un pays riche en eau ralentit toute réaction institutionnelle face à cette situation, ce qui profite évidemment à l'industrie,

qui peut compter sur un approvisionnement en eau passablement fiable et bon marché. Cependant, il existe aussi un « envers de la médaille » majeur, à savoir que l'on ne prête presque aucune attention à la nature des demandes en eau. Certaines données tendent à montrer que la tarification des prélèvements d'eau favorise la conservation tout en ayant relativement peu d'incidence sur les coûts pour l'industrie (Dupont et Renzetti, 1999; Tate et al., 1992).

Mesures incitatives améliorées pour favoriser l'économie d'eau. Bien que les taux de réutilisation de l'eau dans les usines canadiennes aient connu une hausse entre 1991 et 1996, les niveaux de prélèvement sont encore élevés par rapport à ceux de nombreux autres pays, en grande partie parce que les mesures incitatives visant à favoriser la réutilisation sont insuffisantes ou inexistantes (Kollar et MacAuley, 1980). Dans bien des cas, les niveaux élevés de prélèvement par les industries ont eu pour effet d'exercer des pressions sur les utilisations connexes de l'eau. Le bas prix de l'eau n'incite pas beaucoup les décideurs à prendre des mesures de conservation et adopter d'autres changements technologiques. Des mesures incitatives plus rigoureuses, axées sur l'amélioration du rendement, peuvent avoir un impact considérable sur l'utilisation industrielle de l'eau.

Instruments économiques pour une meilleure répartition de l'eau. La répartition de l'eau implique la distribution de droits relatifs à l'utilisation des réserves disponibles. Ce problème peut devenir crucial lorsque les réserves en eau sont restreintes. Dans l'ensemble du Canada, les systèmes de répartition de l'eau sont relativement peu évolués; ils reposent notamment sur des régimes administratifs et de permis sans grande incidence économique et sur des listes arbitraires d'utilisations prioritaires qui doivent être employées pendant les périodes de pénurie d'eau. On a récemment tenté, en Alberta, de développer des marchés pour l'eau qui emploient des mécanismes économiques pour influencer la répartition de l'eau (Horbulyk et Lo, 1998). Ces initiatives s'inspirent des accords de commercialisation de l'eau en vigueur dans le sud-ouest des États-Unis. (Les lecteurs intéressés par une analyse plus complète des marchés de l'eau peuvent consulter le volume dans lequel figure le chapitre de Horbulyk et Lo.)

Promotion de l'innovation technologique. Les industries situées dans des régions touchées par des pénuries d'eau sont confrontées à des contraintes d'approvisionnement en eau périodiques et en grande partie saisonnières. À court terme, cette situation pourrait entraîner une diminution de la production, bien que de nombreuses informations tendent à démontrer que les industries s'adaptent rapidement aux pénuries d'eau au moyen d'approches de substitution technologiques, notamment la réutilisation de l'eau ainsi que d'autres mesures axées sur la conservation (Hansen, 1994). Ainsi, en constituant le capital initial pour la construction d'usines dans des régions touchées par les pénuries d'eau, on a axé de nombreux procédés de fabrication sur la conservation de l'eau. L'usine de pâtes et papiers Miller située à Meadow Lake, en Saskatchewan, constitue un très bon exemple au Canada, puisqu'elle est caractérisée par un rejet d'eau nul, des niveaux très élevés de recyclage ainsi qu'un système de traitement des déchets sur place, et qu'elle ne prélève que de petites quantités d'eau pour compenser les pertes attribuables à l'évaporation (Evans, 1994).

Les technologies employées par les fabricants pour la conservation de l'eau sont trop nombreuses pour être décrites dans le présent document. Aux États-Unis, certains États ont élaboré des guides sur la conservation de l'eau propres à certains secteurs industriels (California Department of Water Resources, 1994; North Carolina Department of Environment and Natural Resources, 1998). Au Canada, les groupes industriels et les différents paliers de gouvernement ont en général favorisé la conservation de l'eau au moyen de programmes de prévention de la pollution. Néanmoins, le partage des connaissances et des innovations technologiques propres aux industries et axées sur la conservation de l'eau exige qu'on s'y intéresse de façon soutenue afin d'obtenir davantage d'attention et d'action.

En résumé, bien que les centrales thermiques et l'industrie manufacturière prélèvent de grandes quantités d'eau douce au Canada, leur consommation (l'eau qui n'est pas retournée à sa source d'origine) est relativement inférieure à celle de certains autres secteurs tels que l'agriculture, bien que cette situation puisse varier dans beaucoup de régions. Les prélèvements industriels importants dans les petits cours d'eau sont susceptibles de constituer la plus grande menace immédiate pour la disponibilité de l'eau.

L'estimation de la demande future en eau dans ces secteurs est très incertaine en raison du nombre élevé de facteurs (niveau de production, avancement technologique, règlements en matière d'environnement et coûts des autres intrants) qui entrent en ligne de compte pour la détermination des niveaux de prélèvement de l'eau. La déréglementation de l'électricité (qui pourrait pousser certaines centrales thermiques et hydroélectriques à utiliser de plus grandes quantités d'eau pour augmenter leur production de charge de pointe) et les changements climatiques (qui peuvent entraîner une augmentation de l'utilisation de l'eau dans nombre d'industries manufacturières pour répondre à des besoins de refroidissement accrus) représentent deux nouveaux enjeux qui doivent être examinés. L'industrie de l'eau embouteillée au Canada, qui ne constitue pas un utilisateur d'eau important actuellement, doit aussi faire l'objet d'une surveillance étant donné sa

récente capacité de croissance rapide et constante qui pourrait avoir des effets localisés sur les aquifères.

Les principaux besoins sur le plan de la collecte de données et de la recherche consistent à recueillir des données sur le prélèvement et la consommation de l'eau pour que l'on puisse déterminer les impacts biophysiques et socio-économiques potentiels de ces activités et mieux comprendre les facteurs qui ont une incidence sur l'utilisation industrielle de l'eau. De plus, il faudrait veiller à envoyer des signaux appropriés en matière de tarification lorsqu'il est question de permettre des prélèvements d'eau si on désire favoriser l'innovation technologique et une plus grande économie d'eau. Actuellement, dans nombre de provinces, on n'impose pas de frais ou encore on exige des frais minimes pour le prélèvement direct de l'eau (généralement par des grandes centrales thermiques ou hydroélectriques et des usines qui possèdent leur propre système d'approvisionnement). En conclusion, il faudrait étudier le rôle des instruments économiques dans la répartition plus efficace de l'eau.

Références

Boyce, F.M., P.F. Hamblin, D.L.D. Harvey, W.M. Schertzer et C.R. McCrimmon. 1993. « Response of the thermal structure of Lake Ontario to deep cooling water withdrawals and to global warming ». J. Great Lakes Res. 19(3): 603-616.

California Department of Water Resources (CDWR). 1994. « Water efficiency guide for business managers and facility engineers, Sacramento, California ».

Dupont, D.P. et S. Renzetti. 1999. « An assessment of the impact of charging for provincial water use permits ». Can. Public Policy 25(3): 361-378.

Dupont, D.P. et S. Renzetti. 2001. « The role of water in manufacturing ». Environ. Resour. Econ. 18(4): 411-432.

Dupont, D.P., S. Renzetti et J. Roik. 2002. « Message in a bottle: water quality for sale ». Presented at Drinking Water Safety: A Total Quality Approach Conference ». Sept. 23-25, 2002, Ottawa, Canada.

Environnement Canada. 2002. Utilisation industrielle de l'eau, 1996. Ministère des Travaux publics et des Services gouvernementaux Canada, Ottawa, Ontario.

Evans, T. 1994. « An overview of the water recovery process at Millar Western's Meadow Lake Mill », p. 347-357. *Dans* D. Shrubsole et D. Tate (s. la dir. de), « Every drop counts ». Association canadienne des resources hydriques, Cambridge (Ont.).

FCM. 1985. « Municipal infrastructure in Canada: physical condition and funding adequacy ». Fédération canadienne des municipalités. Ottawa-Hull.

Hansen, T. 1994. « Water management for water and cost saving through continuous improvement », p. 347-357. *Dans* D. Shrubsole et D. Tate (s. la dir. de), « Every drop counts ». Association canadienne des resources hydriques, Cambridge (Ont.).

Horbulyk, T. et L. Lo. 1998. « Welfare gains from potential water markets in Alberta, Canada », p. 241-257. *Dans* K.W. Easter, M. Rosegrant et A. Dinar (s. la dir. de), « Markets for water: potential and performance ». Kluwer Academic Press, Boston.

Jay, D.A. et C.A. Simenstad. 1996. « Downstream effects of water withdrawals in a small, high-gradient basin: erosion and deposition on the Skokomish River Delta ». Estuaries 19(3): 501-517.

Kollar, K.L. et P. Macauley. 1980. « Water requirements for industrial development ». J. Amer. Water Works Assoc. 72(1): 2-9.

Limno-Tech, Inc. 2002. « Ecological impacts of water use and changes in levels and flows: a literature review. Prepared for the Great Lakes Commission », juin 13, 2002, par Michel Slivitzky.

North Carolina Department of Environment and Natural Resources (NCDENR). 1998. « Water efficiency manual for commercial, industrial and institutional facilities ». Raleigh, North Carolina.

NRTEE. 1996. « State of the debate on the environment and economy: water and wastewater services in Canada. National Round Table on the Environment and Economy », Ottawa.

Renzetti, S. 2003. « Commercial and industrial water demands ». *Dans* D.E. Agthe, R.B. Billings et N. Buras (s. la dir. de), « Managing urban water supply: economic and hydrological analysis of urban water supply problems ». Kluwer Academic Press, Norwell, Massachusetts. Sous presse.

Renzetti, S. 1992. « Estimating the structure of industrial water demands: the case of Canadian manufacturing ». Land Economics 68(4): 396-404.

Renzetti, S. 2002. « Introduction », p. 1-20. *Dans* S. Renzetti, (s. la dir. de), « Economics of industrial water use ». Edward Elgar, Londres.

Rodrigo, D., T. Blair et B. Thomas. 1996. « Integrated resources planning and reliability analysis: a case study of the Metropolitan Water District of Southern California », p. 49-73. *Dans* D. Hall (s. la dir. de), « Advances in the economics of environmental resources ». JAI Press, Greenwich, Connecticut.

Solley, W., R. Pierce et H. Perlman. 1999. « Estimated use of water in the United States in 1995 ». United States Geological Survey Circular 1200.

Statistique Canada. 2000. L'activité humaine et l'environnement, 2000. No au catalogue : 11-509-XPE, Ottawa, Ontario.

Tate, D.M. 1985. « Alternative futures of Canadian water use, 1981-2011. Inquiry on Federal Water Policy, Research Paper #17 », Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Hull.

Tate, D.M. 1977. Enquête sur l'utilisation de l'eau *dans* les industries manufacturières en 1972 : résumé des résultats. Ministère de l'Environnement, Direction générale des eaux intérieures, Collection des sciences sociales; étude no 7. Ottawa-Hull.

Tate, D.M. 1983. Mode d'utilisation de l'eau *dans* les industries manufacturières du Canada, 1976. Environnement

Canada, Direction générale des eaux intérieures, Collection des sciences sociales; étude no 18 Ottawa-Hull.

Tate, D. et J. Harris. 2002. « A water demand forecasting model and sample forecast for Ontario, 1996-2021. Report prepared for Environment Canada and Ontario Ministry of Natural Resources ».

Tate, D. et J. Harris. 1999. « Water demands in the Canadian section of the Great Lakes basin, 1972-2021. Unpublished report prepared for the International Joint Commission ».

Tate, D.M., S. Renzetti et H.A. Shaw. 1992. Instruments économiques pour la gestion de l'eau : tarification de l'eau *dans* l'industrie. Environnement Canada, Direction de la conservation et de l'économie, Collection des sciences sociales; étude no 26, Ottawa, Ontario.

Tate, D.M. et D.N. Scharf. 1992. Utilisation de l'eau *dans* les industries canadiennes en 1986. Environnement Canada, Direction de la conservation de l'eau et des habitats. Collection des sciences sociales; étude no 24, Ottawa-Hull.

Tate, D.M. et D.N. Scharf. 1995. L'utilisation de l'eau *dans* l'industrie canadienne en 1991. Environnement Canada, Direction de la conservation de l'eau et des habitats. Collection des sciences sociales; étude no 31, Ottawa-Hull.

---

[1]Le Canada est l'un des rares pays qui mène des enquêtes périodiques sur l'utilisation industrielle de l'eau. Les renseignements sur l'utilisation de l'eau par l'industrie manufacturière et les centrales thermiques qui figurent dans le présent rapport proviennent d'une enquête sur l'utilisation industrielle de l'eau réalisée en 1996 par Environnement Canada (Environnement Canada, 2002) et sont comparés avec des évaluations et des recherches antérieures dont les résultats sont présentés dans Tate et Scharf (1995, 1992), Tate (1983, 1977) et Dupont et Renzetti (2001).

[2]Tate (1985) présente une description complète de cette méthodologie.

[3]Voir http://www.on.ec.gc.ca/water/water-use/intro-f.html et http://www.glc.org/waterquantity/wrmdss/ pour de plus amples renseignements sur ces initiatives.

Chapitre 7

PRATIQUES ET CHANGEMENTS CONCERNANT L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE – AGRICULTURE

Brook Harker[1], John Lebedin[1], Michael Goss[2], Chandra Madramootoo[3], Denise Neilsen[4], Brent Paterson[5] et Ted van der Gulik[6]

[1] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Administration du rétablissement agricole des Prairies, Regina (Sask.)

[2] Université de Guelph, Chaire de gérance du territoire, Guelph (Ont.)

[3] Université McGill, Département de génie agricole et des biosystèmes, Montréal (Qc)

[4] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherches agricoles de la région du Pacifique, Summerland (C.-B.)

[5] Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et du Développement rural de l'Alberta; Direction de l'irrigation, Lethbridge (Alb.)

[6] Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Pêches de la Colombie-Britannique, Gestion des ressources, Abbotsford, (C.-B.)

Situation actuelle

Utilisation des terres et de l'eau

L'agriculture représente 30 % du produit intérieur brut du Canada, ce qui en fait un des secteurs les plus importants du pays. Environ 7 % des terres du Canada sont utilisées pour l'agriculture, soit 67,5 millions d'hectares. Les provinces des Prairies comptent 82 % de ces terres, alors que l'Ontario et le Québec n'en comptent que 13 %, bien que la productivité à l'hectare soit généralement plus élevée dans ces deux provinces. Les terres agricoles se composent de 46 millions d'hectares de terres améliorées, telles les terres cultivables et en jachère, et de 20 millions d'hectares de terres non améliorés utilisées comme pâturages (Statistique Canada, 2002).

Bien que l'agriculture ne constitue pas le secteur où on utilise le plus d'eau au Canada, elle affiche la plus grande consommation nette. À l'échelle nationale, 44,61 milliards de mètres cubes d'eau de surface sont prélevés des cours d'eau par les utilisateurs principaux (1996). De son côté, le secteur de l'agriculture (1991) n'en a prélevé qu'environ 9 %, tandis que les centrales thermiques et l'industrie manufacturière en prélevaient 64 et 14 % respectivement. Même si, dans l'ensemble, seulement environ 10 % (4,5 milliards de mètres cubes) de l'eau prélevée soit réellement consommée, le secteur de l'agriculture consomme 71 % de l'eau qu'il prélève, ce qui en fait de loin le plus grand consommateur. De plus, on observe des différences marquées entre les régions en ce qui a trait à l'utilisation agricole de l'eau. Environ 85 % des prélèvements agricoles (eaux de surface et souterraines) servent à l'irrigation (principalement dans l'Ouest) et 15 %, à l'abreuvement du bétail (Environnement Canada, 2002a, 2002b). Les eaux souterraines, bien qu'elles soient utilisées à un volume relativement faible en comparaison avec l'eau de surface, représentent 26 % (6,2 millions de personnes) de la consommation domestique totale, et 82 % des Canadiens vivant en milieu rural (environ 4 millions de personnes) dépendent des nappes d'eaux souterraines (Conseil des sciences du Canada, 1988).

L'accès permanent à des ressources en eau de bonne qualité et fiables est nécessaire au développement agricole durable et à l'augmentation du nombre de terres améliorées. On ne peut trop insister sur l'importance de l'eau pour l'agriculture. De même, l'emploi de l'eau pour irriguer les récoltes, abreuver le bétail, transformer les produits et assurer la subsistance des familles agricoles dans les zones urbaines et rurales revêt une importance considérable.

Effets de l'agriculture sur le cycle hydrologique

L'utilisation accrue des terres agricoles au Canada modifie l'hydrologie naturelle du paysage, ce qui se répercute sur la disponibilité relative de l'eau et, dans certains cas, sur sa qualité. Les gens en général perçoivent, sans toutefois bien comprendre, que la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines se détériore vraisemblablement dans les zones agricoles en raison des charges accrues d'éléments nutritifs, de pesticides et d'agents pathogènes.

Les cultures irriguées et celles dépendantes des précipitations de pluie pour leur irrigation influent sur l'écoulement de l'eau dans le paysage. La dérivation et la redistribution de l'eau par les réseaux d'irrigation et d'égouttement ont une incidence significative sur le cycle hydrologique naturel. Le type de culture et sa gestion peuvent modifier l'infiltration et l'écoulement de l'eau

dans le sol et, par conséquent, les régimes d'écoulement de surface et d'écoulement souterrain. Il en résulte parfois une augmentation des phénomènes de ruissellement maximal et d'envasement dans les cours d'eau, une diminution des débits de base dans les petits cours d'eau ainsi qu'une réduction de l'infiltration de surface, qui peut être nécessaire, dans certaines régions, à la réalimentation de nappes d'eau souterraines assurant le maintien de milieux humides et l'approvisionnement en eau.

Les effets du type de culture sur le ruissellement et les pertes de sol sont bien connus (tableau 2). Le ruissellement est vraisemblablement moindre dans le cas des cultures qui couvrent le sol en permanence (p. ex., pâturages, champs de foin et cultures horticoles vivaces [couvert herbacé des vergers]).

Méthodes culturales de conservation du sol. Dans le cas des cultures semées chaque année, les pratiques culturales de conservation du sol qui ont été élaborées au cours des 15 à 20 dernières années et qui sont généralement reconnues peuvent réduire considérablement la quantité d'eau, de sédiments et d'éléments nutritifs en surface qui gagneront les cours d'eau. Avec de telles pratiques, 30 % ou plus des résidus de culture demeurent sur le sol. Par exemple, au Québec, on a observé une diminution de 60 % du ruissellement dans des champs de maïs en semis direct par rapport à des champs de maïs cultivé de façon classique (McRae et al., 2000). En Saskatchewan, à l'échelle d'un bassin hydrographique, le ruissellement de l'eau issue de la fonte des neiges sur des superficies non labourées depuis longtemps était inférieur à la moitié du ruissellement mesuré dans des champs travaillés de façon classique, et le ruissellement durant les orages d'été était également moindre (Elliott et al., 1998). L'adoption de pratiques culturales de conservation du sol s'est traduite par la diminution du nombre de jours où les sols demeurent dénudés et exposés à l'érosion. Selon McRae et al. (2000), entre 1981 et 1996, le nombre de jours où les sols étaient dénudés, par hectare et par année, a diminué de 2 % au Québec et de 44 % à Terre-Neuve-et-Labrador, la moyenne canadienne étant d'environ 20 %.

Égouttement, drainage et irrigation. En raison des conditions climatiques rencontrées au Canada, l'aménagement de réseaux d'égouttement et d'irrigation efficaces est souvent essentiel au succès de la production agricole. L'Est canadien et les régions côtières de la Colombie-Britannique connaissent un surplus de précipitations à certaines périodes de l'année. Il faut donc aménager des réseaux d'égouttement pour extraire l'excès d'eau des sols. Comme l'égouttement naturel et l'égouttement de surface n'abaissent pas la nappe phréatique assez rapidement pour permettre une préparation du lit de semence et un ensemencement hâtifs, souvent il faut recourir au drainage (installation de drains souterrains) pour favoriser l'assèchement des sols et permettre le passage des machines agricoles.

Par contre, l'irrigation peut être nécessaire dans les Prairies et dans d'autres régions du Canada où le volume des précipitations annuelles (d'aussi peu que 300 millimètres dans le sud-ouest de la Saskatchewan à 550 millimètres à Beauséjour, au Manitoba) est souvent insuffisant pour combler les besoins en eau des cultures liés à l'évapotranspiration. Dans les régions où l'irrigation est une pratique largement répandue (principalement en Alberta et en Colombie-Britannique), jusqu'à 35 à 40 % des précipitations reçues chaque année dans les bassins hydrographiques touchés seront dérivées pour l'irrigation. Or, cette pratique constitue une modification importante des processus hydrologiques naturels dans ces bassins.

Système d'irrigation à tubes de descente - Économie de l'eau et de l'énergie.

Consommation – Irrigation

Une grande partie de l'eau nécessaire à l'irrigation tout au long de la saison de croissance doit être captée au moment de la fonte des neiges au printemps et emmagasinée derrière des barrages ou dans des réservoirs. L'eau ainsi stockée subit d'importantes pertes par évaporation tout au long de l'année. En outre, la dérivation de l'eau pour la production végétale entraîne des pertes gazeuses par évapotranspiration qui excèdent généralement les pertes observées dans les couverts végétaux naturels. Le reste de l'eau d'irrigation dérivée ne profite pas aux cultures, puisqu'elle est soit stockée dans le sol sous la zone d'enracinement, soit perdue dans les eaux souterraines, soit retournée aux réseaux hydrographiques par ruissellement.

Au Canada, environ 75 % de tous les prélèvements d'eau agricoles ont lieu dans les Prairies, principalement pour l'irrigation. L'Alberta comprend approximativement 630 000 hectares de terres irriguées, soit environ 60 %

de toutes les terres cultivables irriguées au Canada. Dans la partie du bassin de la rivière Saskatchewan Sud qui se trouve en Alberta, environ 2,2 milliards de mètres cubes d'eau sont prélevés tous les ans dans le réseau hydrographique pour les besoins de l'irrigation, ce qui équivaut à 28 % du débit annuel total de ce réseau. En vertu de l'accord sur la répartition des eaux des provinces des Prairies, 50 % du débit d'eau naturel annuel dans le bassin de la rivière Saskatchewan Sud doit s'écouler vers la Saskatchewan. En conséquence, la répartition et l'irrigation représentent 78 % des engagements de l'Alberta concernant l'eau du bassin de la rivière Saskatchewan Sud, ce qui laisse environ 22 % du débit pour toutes les autres utilisations, y compris les utilisations municipales, industrielles et environnementales. En raison de l'augmentation de la demande en eau dans tous les secteurs, certains bassins hydrographiques de l'Alberta font l'objet d'une répartition complète ou presque complète et sont soumis à des moratoires sur la dérivation de l'eau.

L'agriculture a donc dû adopter des pratiques de gestion qui optimisent la quantité d'eau dérivée par unité de rendement de culture, en améliorant l'efficacité du stockage, de la distribution et de l'utilisation à la ferme. Ainsi, le district d'irrigation de la rivière St. Mary en Alberta a réduit à moins de 7 % la quantité totale d'eau dérivée « perdue » dans les flux de restitution vers le réseau hydrographique. Ces résultats révèlent une amélioration de l'utilisation de l'eau et, par conséquent, une réduction des exigences en matière de dérivation par unité de récolte produite. Ces améliorations résultent de l'aménagement de réservoirs de retenue internes, de la pose d'un revêtement dans les canaux d'irrigation, du remplacement des canaux de surface par des pipelines et du passage des systèmes d'irrigation par submersion à des systèmes d'irrigation par pivot central hautement efficaces (Irrigation Water Management Study Committee, 2002).

L'irrigation au Canada s'effectue principalement au moyen de systèmes d'arrosage. Ce type d'irrigation a beaucoup moins d'impact sur l'hydrologie superficielle que l'irrigation par submersion, qui affiche souvent des pertes d'eau de surface pouvant atteindre 50 % (Irrigation Water Management Study Committee, 2002). En Alberta, le délaissement de l'irrigation par submersion au profit des systèmes à pivot central a éliminé ces pertes. En Colombie-Britannique, grâce aux systèmes de micro-irrigation (irrigation goutte à-goutte), qui offrent la possibilité d'éliminer les pertes en surface et de limiter les pertes sous la surface, on a optimisé davantage l'utilisation de l'eau pour la production végétale.

L'objectif actuel consiste à augmenter l'efficacité de l'irrigation au moyen de systèmes à rendement plus élevé, à améliorer la gestion des eaux, à établir des calendriers d'irrigation pour satisfaire aux demandes en eau des cultures, à éliminer les pertes par évaporation et à produire des cultures de plus grande valeur. Dans la vallée de l'Okanagan, en Colombie-Britannique, on a commencé à pratiquer l'irrigation (par submersion) dans les années 1940. Vers la fin des années 1950 et dans les années 1960, on est passé à des systèmes par aspersion plus efficaces. De nos jours, 30 % des zones plantées de vergers ont délaissé l'irrigation par aspersion au profit de la micro-irrigation, qui est de 70 à 90 % plus efficace que l'irrigation par aspersion (Ted van der Gulik, communication personnelle). On utilise aussi du paillis pour réduire les pertes par évaporation dans les cultures horticoles. Dans le cas d'arbres nouvellement plantés, on a constaté que la réduction des pertes par évaporation atteignait 50 %, mais qu'elle diminuait à 10 % à mesure que les arbres grandissaient.

En Alberta, le remplacement de l'irrigation par submersion par l'irrigation par pivot central a entraîné une amélioration du rendement de l'irrigation de 40 %. On a estimé que les pertes par infiltration affichées par les réseaux de canaux en 1991 des 13 districts d'irrigation atteignaient 471,76 millions de mètres cubes. Une analyse plus détaillée menée en 1999, après que des efforts de rétablissement considérables aient été déployés, indique que les pertes par infiltration étaient alors de 89,75 millions de mètres cubes. On pense que la rénovation des canaux prévue réduira davantage les pertes par infiltration – jusqu'à environ 54 millions de mètres cubes, ce qui représente 1,5 % du volume d'eau brut dérivé par année (Irrigation Water Management Study Committee, 2002).

La demande actuelle pour l'irrigation dans l'est du Canada est relativement faible du fait que cette région connaît généralement un excédent annuel de précipitations par rapport à l'évapotranspiration. La superficie irriguée totale dans cette région est d'environ 100 000 hectares. L'irrigation est principalement utilisée pour des cultures horticoles à valeur élevée dans les secteurs des fruits et des légumes. L'irrigation est pratiquée pendant les mois de juin, de juillet et d'août pour compenser le manque de pluie et contribuer à combler les besoins liés à l'évapotranspiration des cultures. Les principales méthodes d'irrigation utilisées dans l'est du Canada sont les systèmes d'aspersion et les installations goutte-à-goutte.

Le passage à des systèmes d'irrigation efficaces n'entraînera de véritables économies d'eau que si ces systèmes sont gérés correctement. Les progrès accomplis au chapitre des techniques d'établissement de calendriers d'irrigation (à l'aide de données sur l'humidité du sol, le climat ou les conditions météorologiques) permettent aux agriculteurs de planifier leur arrosage chaque jour. En Colombie-Britannique, on a observé que l'établissement de calendriers d'irrigation à l'aide de systèmes entièrement automatisés régis par des dispositifs de

Tableau 1. Besoins journaliers moyens en eau des animaux de ferme[1]

Type d'animaux	Eau (L/jour)
Bovins de boucherie	35
Vaches de boucherie	55
Vaches laitières	160
Truies nourrices	20
Porcs d'engraissement	10
Brebis	7
Poules pondeuses	0.25-0.30
Poulets à griller	0.15-0.20

[1]Agriculture et Agroalimentaire Canada (2000). *La santé de l'eau - Vers une agriculture durable au Canada.*

surveillance des besoins liés à l'évaporation (Parchomchuk et al., 1996) permettait une réduction de l'utilisation de l'eau de l'ordre de 20 à 30 % (Neilsen et Neilsen, 2002).

Besoin en sources d'eau potable fiables. Dans certaines régions, les acheteurs commencent à exiger que l'on vérifie que de l'eau propre à la consommation humaine est utilisée pour irriguer les cultures et laver les récoltes qui sont envoyées au marché en frais. L'eau de nombreuses sources d'approvisionnement ne pourra répondre à de tels critères sans avoir subi certaines formes de traitement, ce qui pourrait être problématique. On observe par conséquent une tendance vers l'utilisation des eaux souterraines, bien que les caractéristiques de cette ressource soient encore mal comprises dans de nombreuses régions du pays.

Consommation – Élevage

Le secteur e l'élevage est une composante importante de l'industrie agroalimentaire du Canada. Actuellement, environ 15,5 millions de bovins et de veaux, 14 millions de porcs et 140 millions de volailles sont produits dans l'ensemble du Canada (Statistique Canada, 2002). La production de bétail de qualité nécessite un approvisionnement stable en eau de haute qualité, comme l'indique le tableau 1. Les eaux souterraines fournissent presque toute l'eau utilisée aux fermes d'élevage au Canada (Conseil des sciences du Canada, 1988).

Dans certaines régions du pays, comme au Québec, l'expansion de l'industrie de l'élevage intensif a été limitée en raison de préoccupations au sujet de la qualité de l'eau. Les pratiques d'élevage actuelles favorisent une réduction de l'utilisation de l'eau au moyen de techniques améliorées. Par exemple, aux fermes laitières, on peut réaliser des économies d'eau en prenant certaines initiatives, notamment en grattant ou en balayant les planchers des aires de traite avant de les laver, en réutilisant l'eau qui a servi à rincer le matériel pour laver les planchers, en utilisant des gicleurs haute pression pour le lavage, en installant des éviers qui économisent l'eau et en utilisant l'eau du premier rinçage des lactoducs pour abreuver les veaux.

Effets de l'égouttement et du drainage

On comprend bien les effets bénéfiques de l'égouttement et du drainage des terres sur la production végétale. Les systèmes d'égouttement de surface comprennent des fossés peu profonds qui tirent l'eau des dépressions dans les champs ainsi que des fossés plus profonds qui servent à intercepter les eaux de ruissellement et de suintement et les empêcher ainsi d'entrer de nouveau dans les terres agricoles. L'eau récupérée par ces ouvrages aboutit dans les voies d'eau naturelles. Les systèmes d'égouttement de surface peuvent augmenter le ruissellement, et cette eau peut être de piètre qualité et renfermer de plus fortes quantités d'éléments nutritifs, de produits agrochimiques et de sédiments. On a remarqué que les techniques de conservation du sol, comme l'aménagement de zones tampons et de voies d'eau engazonnées, réduisaient considérablement le mouvement des eaux sur le sol en plus d'améliorer la qualité de l'eau dans les ouvrages d'égouttement de surface (tableau 2). Il reste cependant un travail considérable à effectuer si l'on veut clarifier davantage la valeur d'un éventail de pratiques de gestion bénéfiques et adopter celles-ci dans l'ensemble du Canada.

Les systèmes de drainage (drains souterrains) peuvent influer sur la qualité de l'eau des réseaux d'égouttement de surface en aval en transportant d'importants volumes d'eau (susceptibles de contenir des agents pathogènes, des éléments nutritifs et des produits agrochimiques) dans les cours d'eau naturels. Une des méthodes utilisées pour limiter les pertes d'eau et d'éléments nutritifs attribuables au drainage consiste à établir un système de gestion de la nappe phréatique. Ce système a été utilisé avec succès au Québec (Madramootoo et al., 2001) et en Ontario (Drury et Tan, 2000). Il réduit le drainage de l'eau à des moments précis de la saison de croissance et utilise par la suite l'eau emmagasinée pour l'irrigation souterraine pendant les périodes de pénurie d'eau. On a démontré, à l'aide de cette technique, qu'une diminution des pertes d'eau attribuables au drainage entraînait une réduction des pertes de nitrates pouvant atteindre 39 %. On peut aussi réduire les pertes d'éléments nutritifs et d'eau causées par le drainage en ensemençant des plantes abris d'hiver qui emmagasineront les éléments nutritifs et l'eau à la fin de la saison de croissance de la culture principale (Milburn et al., 1997).

Tendances futures et nouveaux enjeux

Utilisation des terres et de l'eau

Compte tenu de la conjoncture du marché, les agriculteurs canadiens doivent produire des aliments de qual-

Tableau 2. Ruissellement saisonnier dans des champs de pommes de terre soumis à différents assolements au NouveauBrunswick[1,2]

Culture et année	Pluie accumulée (mm)	Voies d'eau de dérivation et engazonnées		Culture dans le sens de la pente(mm)	
		Ruissel-lement (mm)	Perte de sol (kg/ha)	Ruissel-lement (mm)	Perte de sol (kg/ha)
Céréales/ray-grass 1990	707	32	106	25	285
Pommes de terre 1991	582	42	1678	203	15,604
Orge 1993	687	8	63	34	489

[1]Tableau 8-3, Agriculture et Agroalimentaire Canada (2000), *La santé de l'eau - Vers une agriculture durable au Canada*.
[2]Source : McRae et al. (2000).

ité à un prix compétitif pour subvenir aux besoins d'une population mondiale croissante. Cette situation entraînera une augmentation de la concurrence parmi les différentes utilisations et approches de gestion des ressources en eau, ce qui aura pour effet d'accroître les pressions exercées pour l'exploitation d'autres ressources en eau et l'aménagement d'ouvrages de dérivation et de systèmes d'adduction, avec toutes les considérations sociales et environnementales qui s'ensuivent.

Coût relatif de l'eau. En raison de la concurrence accrue entre les utilisations sur place des cours d'eau (p. ex., pêche et loisirs) et celles qui consomment l'eau (notamment les utilisations domestiques et industrielles), le secteur agricole devra respecter la véritable valeur économique de l'eau et s'assurer d'utiliser cette ressource de manière optimale. La demande croissante pour l'eau ainsi que le fait que des entreprises offrant des produits à valeur élevée (lotissements ruraux, terrains de golf, installations récréatives, etc.) soient prêtes à payer pour accéder à ces ressources a pour effet d'inciter les agriculteurs à chercher d'autres sources d'eau, comme les effluents municipaux, ou à offrir leurs sources d'eau en vendant tout simplement leurs terres ou leurs droits d'utiliser l'eau.

Cycle hydrologique

L'expansion des ressources en terres agricoles et l'augmentation de la demande pour l'eau et la gestion des eaux de la part du secteur agricole peuvent contribuer aussi aux répercussions sur le cycle hydrologique. Cependant, cette contribution pourrait aller en diminuant comparativement à la situation dans le passé, en raison de l'adoption de pratiques de gestion bénéfiques dans le secteur agricole comme les méthodes de conservation du sol. Toutefois, même les pratiques qui réduisent un danger en particulier (p. ex., érosion du sol et ruissellement) peuvent entraîner une augmentation des risques associés à un autre danger. Ainsi, même si le travail réduit du sol diminue les pertes d'eau et l'apport de certains polluants par le réseau d'égouttement, il peut entraîner une augmentation de l'infiltration de polluants dans le sol et leur lessivage vers les eaux souterraines. Il peut accroître le mouvement des éléments nutritifs mobiles et de certains pesticides vers les drains et les eaux souterraines plus profondes le long de voies préférentielles (p. ex., fissures et trous de vers) dans le sol (Drury et al., 1996; Gaynor et al., 2002; Drury et Tan, 2000).

L'augmentation de la percolation pourrait aussi entraîner une réduction du ruissellement prévu vers les bourbiers et les étangs de retenue locaux. En outre, les plus fortes concentrations de matières organiques dans les champs soumis à un travail réduit du sol, notamment dans les cultures en semis direct, tendent à retenir les grosses particules de sol présentes dans les eaux de ruissellement, augmentant de ce fait le rapport entre les petites et les grosses particules de sol que contiennent ces eaux (Bernard et al., 1992). La matière organique en décomposition dans les champs soumis à un travail réduit du sol peut aussi entraîner une augmentation des concentrations d'éléments nutritifs solubles, notamment le phosphore, dans les eaux de ruissellement (Pesant et al., 1987). Un tel accroissement des charges d'éléments nutritifs pourrait même annuler les bienfaits d'une réduction du volume des eaux de ruissellement en augmentant le risque d'eutrophisation.

Certains programmes (p. ex., le Programme d'établissement d'une couverture végétale permanente d'Agriculture et Agroalimentaire Canada) ont favorisé la conversion de terres agricoles peu productives pour les cultures annuelles en des superficies à couverture végétale permanente (pâturages et prairies de luzerne). Le programme de couverture végétale national récemment annoncé, qui fait partie du nouveau Cadre stratégique pour l'agriculture d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2002), donne suite à cet objectif. De telles mesures ont pour but de réduire davantage le ruissellement et d'améliorer l'alimentation des nappes souterraines, tout en favorisant une meilleure filtration des charges de sédiments, d'éléments nutritifs, de pesticides et, dans certains cas, d'agents pathogènes susceptibles de contaminer les cours d'eau.

Consommation – Irrigation

L'augmentation de la demande en eau liée à l'irrigation entraînera une augmentation de la demande pour des barrages, des réservoirs et des ouvrages de dérivation. Comme on l'a mentionné précédemment, les ressources en eau de nombre de bassins hydrographiques sont maintenant entièrement réparties et, par conséquent, une économie accrue sur le plan de l'irrigation devra être réalisée si la surface irriguée augmente, et ce, tout en maintenant des débits acceptables dans les cours d'eau pour d'autres utilisations. Dans certaines régions, l'augmentation de l'efficacité de l'irrigation peut en fait entraîner une augmentation de la quantité d'eau d'irrigation utilisée par unité de terre, là où les récoltes ne reçoivent pas suffisamment d'eau pour avoir une croissance optimale. Par exemple, en Alberta et en Colombie-Britannique, l'évaluation des pratiques d'irrigation a démontré que dans le cas de certaines cultures, les producteurs n'irriguaient pas assez et pouvaient améliorer leur production en augmentant la quantité d'eau appliquée (Ted van der Gulik, communication personnelle; Irrigation Water Management Study Committee, 2002). Par contre, l'amélioration continue de l'efficacité des systèmes d'irrigation et d'adduction permettra d'augmenter la quantité d'eau disponible pour d'autres utilisations.

Les communications sans fil et l'informatique pourraient permettre aux agriculteurs d'obtenir directement des stations météorologiques locales les données dont ils ont besoin pour l'établissement de calendriers d'irrigation. On peut aussi utiliser cette technologie pour évaluer et surveiller les maladies des cultures attribuables au climat, ce qui permettrait une diminution du nombre de traitements antiparasitaires avec des produits chimiques et une réduction de l'exposition des réserves en eau aux produits chimiques. Il faudrait établir d'autres stations météorologiques dans les zones agricoles. De plus, on pourrait utiliser, pour surveiller l'humidité du sol et de la culture, un système de surveillance incorporant un système de positionnement comme celui employé pour l'épandage d'engrais et de pesticides. Mais il faudra que ces techniques soient adoptées par la majorité des producteurs agricoles pour que des gains d'efficacité apportent des résultats concrets, qui prendront la forme d'une diminution de l'utilisation de l'eau et d'une amélioration de sa qualité à l'échelle du bassin hydrographique.

Les coûts reliés à l'agriculture entraînent aussi une augmentation de l'utilisation des ressources en eau dans le secteur agricole. Des terres agricoles de grande valeur qui n'étaient pas irriguées auparavant sont converties pour la production de cultures de plus grande valeur qui ont souvent besoin d'être irriguées pour que l'on puisse maintenir les niveaux de production chaque année. À mesure que l'agriculture progresse vers la diversification des cultures et la production de cultures de plus grande valeur, il est probable que la demande en eau augmentera de façon générale.

Le recours aux systèmes d'irrigation pour refroidir les cultures et les protéger contre le gel augmente les volumes d'eau utilisés. La fertilisation des cultures au moyen des systèmes d'irrigation, une pratique qui améliore la gestion des substances nutritives, peut aussi entraîner une augmentation de l'utilisation de l'eau. Dans l'est du Canada, on prévoit une augmentation de la demande en eau à mesure que les agriculteurs opteront pour des cultures horticoles de plus grande valeur et aussi en raison des sécheresses graves qui sont survenues dans cette région au cours des dernières années.

Besoin accru en eau potable. L'eau utilisée pour l'irrigation et le lavage des produits végétaux qui sont consommés sans cuisson préalable doit être potable, comme l'exigent les programmes d'assurance de la qualité améliorés adoptés dans les fermes laitières. Les coûts de traitement de l'eau de la plupart des sources de surface, qui n'est pas considérée comme potable avant d'avoir subi un certain degré de traitement, pourraient être significatifs. La tendance vers un recours accru aux eaux souterraines, qui étaient jusqu'ici souvent mal définies, se poursuivra. On prévoit un accroissement de la concurrence entre les utilisateurs agricoles et domestiques en ce qui a trait à l'accès aux sources d'eau potable ainsi qu'aux installations connexes nécessaires.

Consommation – Élevage

On s'attend à ce que l'industrie de l'élevage intensif, motivée par les objectifs des politiques provinciales visant à augmenter la production animale, continue à se développer dans certaines régions du Canada (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 1998). Ce développement pourrait être limité en raison de la concurrence accrue pour l'eau ou de contraintes relatives à la pollution des sols et de l'eau dont on doit se préoccuper au niveau de la gestion des fumiers.

Égouttement et drainage

On est de plus en plus sensibilisé à la question de l'impact potentiel des systèmes de drainage et d'égouttement sur l'humidité du sol ainsi que sur le volume et la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Ces facteurs seront de plus en plus pris en considération au moment de la conception des systèmes de drainage et d'égouttement.

Agriculture et changements climatiques

Effet de la variabilité climatique sur l'agriculture et la demande en eau. On s'attend à ce que les questions relatives à la variabilité et au changement climatiques aient un impact significatif sur les pratiques agricoles, qui influeront à leur tour sur la demande en eau et la disponibilité de celle-ci. La variabilité climatique nous

amène à adopter l'irrigation pour assurer de meilleurs rendements et atténuer l'effet des sécheresses. Ainsi, au Manitoba, certains contrats de production de pomme de terre stipulent que de l'eau d'irrigation soit disponible en période de sécheresse. On observe en outre une augmentation du recours à l'irrigation pour protéger les cultures contre le gel et pour les refroidir par temps chaud.

On reconnaît en général que les changements climatiques peuvent avoir un impact plus important dans les Prairies et le centre de la Colombie-Britannique. Les changements observés dans les hydrogrammes des flux d'eau de fonte nivale à la suite de changements climatiques récents (qui peuvent influer sur la disponibilité de l'eau dans le temps) ont déjà été documentés (Leith et Whitfield, 1998; Whitfield, 2001). De plus, les débits des eaux de fonte des glaciers, qui fournissent pendant les mois d'été des volumes d'eau significatifs à des cours d'eau tels que la rivière Bow (Alberta) et le fleuve Columbia (C. B.) cesseront d'exister, puisque les principaux glaciers disparaîtront dans les 50 à 60 années à venir. Cette situation aura un impact significatif (10 % du débit) sur la disponibilité de l'eau pour l'irrigation et sur les débits des cours d'eau soutenant la vie aquatique. En conséquence, il faudra peut-être aménager des installations de stockage additionnelles sur ces cours d'eau afin de répondre à toutes les demandes en eau, et on peut s'attendre à des pressions accrues pour l'utilisation d'une plus grande quantité d'eau souterraine.

On prévoit que les changements climatiques entraîneront une augmentation des températures moyennes à travers le Canada. Par exemple, d'après la modélisation des changements climatiques, les projections indiquent une augmentation de 37 % de la demande en eau d'irrigation dans la vallée de l'Okanagan, en Colombie-Britannique, ce qui peut excéder la quantité disponible dans les districts d'irrigation dépendant du débit des tributaires (Neilsen et al., 2001). En outre, les régions où les cultures ont besoin d'irrigation pourraient s'étendre vers le nord dans les Prairies ainsi que vers l'est en Ontario, au Québec et dans les provinces de l'Atlantique.

Impacts de l'agriculture sur les changements climatiques. L'agriculture est susceptible de contribuer aux changements climatiques, en grande partie en raison du rejet de gaz à effet de serre importants, soit le méthane et l'oxyde nitreux; on cherche par conséquent des façons d'en réduire la production (p. ex., séquestration du carbone, meilleure utilisation des engrais).

Besoins en matière de connaissances et de données

Les besoins en matière de connaissances et de données concernant les menaces que posent l'agriculture et les pratiques d'utilisation des terres sur la disponibilité de l'eau douce, et vice-versa, ont été regroupées en quatre grandes catégories.

Compréhension des bilans hydriques

L'agriculture est un secteur consommateur d'eau mais qui, par les pratiques d'irrigation et d'égouttement/de drainage, contribue aussi à l'alimentation des aquifères et des plans d'eau de surface. Il faut donc mieux comprendre les besoins en eau de l'agriculture ainsi que l'équilibre entre les demandes en eau et les retours dans l'écosystème. On possède une bonne connaissance de l'utilisation de l'eau pour nombre de cultures produites au Canada. Cependant, dans le cas des systèmes irrigués, une bonne partie de cette connaissance est basée sur des hypothèses périmées s'appuyant sur des techniques d'irrigation du passé. De façon générale, il faut approfondir les points suivants.

- Possibilités de réduction de l'utilisation de l'eau : développement de végétaux qui résistent mieux à la sécheresse; utilisation de cultures qui exigent moins d'eau et application de pratiques de gestion qui optimisent la production végétale, en particulier pendant les périodes de pénurie d'eau.
- Besoins en eau des cultures spéciales : pour nombre d'espèces de grande valeur et d'espèces destinées à des créneaux de marché précis qui sont introduites dans les secteurs canadiens de l'agriculture et de l'horticulture.
- Utilisations régionales de l'eau : connaissance des volumes d'eau prélevés, utilisés pour l'irrigation et retournés (l'information est plutôt bonne pour ce qui est de l'Alberta, mais est en général déficiente dans d'autres régions).
- Relation entre l'agriculture et les milieux humides : effet de l'utilisation de l'eau en agriculture et de l'égouttement/du drainage sur les milieux humides et les zones riveraines; débits de base des cours d'eau nécessaires pour soutenir la vie aquatique.
- Effets de la gestion des terres : effets sur le bilan hydrique du sol et la répartition des précipitations; effets sur la disponibilité de l'eau pour tous les utilisateurs, à des échelles allant des champs aux régions.
- Effets potentiels du climat : effets du climat, y compris de la variabilité des conditions météorologiques et des changements climatiques, sur les besoins en eau de l'agriculture et la disponibilité de cette ressource; effets de la gestion des terres sur les conséquences que la variabilité climatique peut avoir sur l'eau.

Il faut aussi :

- établir et maintenir des réseaux de surveillance pour relever les tendances à long terme en matière de récupération, d'utilisation et de qualité de l'eau avec différentes pratiques de gestion des terres;
- documenter les réserves d'eau souterraine pour comprendre leur étendue, leur disponibilité et leur qualité; bien que cette ressource naturelle qu'est l'eau

soit souvent mal comprise, on pense en général que la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines peut se détériorer dans les zones agricoles (pesticides, éléments nutritifs et agents pathogènes);

- améliorer les prévisions météorologiques locales (échelle Mesonet) en augmentant la densité des stations à l'échelle nationale pour optimiser l'utilisation de l'eau et soutenir la surveillance et la prévision du climat dans les zones agricoles.

Clarification des cadres institutionnels

Il importe de mieux comprendre le rôle que doivent jouer les institutions dans l'attribution et la protection des ressources en eau utilisées en agriculture. Il faut aussi adopter des politiques claires sur la répartition de l'eau, en particulier pendant les périodes de pénurie et entre des utilisations concurrentes.

Emploi de stratégies intégrées

Pour marquer des progrès, il faut adopter des pratiques de planification intégrées et des techniques adaptatives grâce auxquelles nous pourrons atténuer les menaces que pose l'agriculture sur la disponibilité de l'eau. Voici quelques points importants à ce sujet.

- Approche axée sur les bassins hydrographiques : incorporer les pratiques agricoles pertinentes aux plans de gestion intégrée des bassins hydrographiques pour tenir compte des nombreuses utilisations de l'eau.
- Réutilisation de l'eau : promouvoir la réutilisation de l'eau lorsque c'est possible, y compris l'utilisation d'eaux usées urbaines par l'agriculture, notamment les eaux provenant des industries de la transformation et de la conserve.
- Amélioration du processus décisionnel : élaborer des systèmes d'aide à la décision ainsi que pour le traitement de l'information afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau ainsi que la compréhension de la disponibilité des eaux souterraines et de leur vulnérabilité aux pratiques agricoles.
- Adoption de stratégies d'adaptation : incorporer des processus pour réduire les effets de la variabilité climatique sur les besoins en eau.

Productivité agricole soutenue

L'utilisation plus intensive des terres pour la production agricole, y compris l'augmentation du nombre de zones irriguées, se poursuivra au Canada. Pour aborder efficacement les questions actuelles et futures concernant la disponibilité de l'eau, il faut entreprendre des actions précises dans les trois domaines généraux suivants.

- Surveillance ciblée : il faut investir dans la surveillance ciblée pour déterminer les tendances, évaluer les limites et réaliser des évaluations de l'incidence écologique des effets des pratiques agricoles sur la disponibilité de l'eau.
- Recherche : il faut mener des recherches continues pour s'assurer que les meilleures connaissances et technologies soient disponibles pour la gestion des terres et des eaux, en mettant l'accent sur la diminution des besoins en eau des cultures et l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Il faut de plus comprendre l'effet des pratiques de gestion des terres sur la disponibilité de l'eau, les caractéristiques du ruissellement et de la lixiviation ainsi que la relation entre la qualité de l'eau et les milieux humides. Enfin, il faut explorer les possibilités de réutilisation de l'eau et améliorer les stratégies d'adaptation à la sécheresse.
- Élaboration de normes et de codes de pratique : il faut élaborer et adopter des pratiques, des normes et des codes reconnus sur le plan scientifique pour les entreprises agricoles afin d'assurer la disponibilité des eaux de surface et des eaux souterraines.

Références

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 1998. Défis et répercussions associés à l'atteinte des objectifs du CCCPA pour les exportations de produits agroalimentaires d'ici l'an 2005. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale des politiques, Direction de l'analyse économique et stratégique, Ottawa (Ont.), Canada. 62 p.

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 2000. La santé de l'eau : vers une agriculture durable au Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale des politiques.

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 2002. Le Canada en tête - Une politique agricole au XXI^{e} siècle. Disponible à l'adresse Web http://www.agr.gc.ca/canadaentete/. Site visité le 10 novembre 2002.

Bernard, C., M.R. Laverdière et A.R. Pesant. 1992. Variabilité de la relation entre les pertes de césium et de sol par érosion hydrique. Geoderma 52: 265-277.

Conseil des sciences du Canada. 1988. De l'eau pour demain : pour une utilisation durable de l'eau au 21^{e} siècle.

Drury, C. et C.S. Tan. 2000. Système de gestion de la nappe phréatique en Ontario, p. 107. *Dans* D.R. Coote et L.J. Gregorich (s. la dir. de), La santé de l'eau. Direction de la planification et de la coordination de la recherche, Direction générale des politiques, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa (Ont.).

Drury, C.F., C.S. Tan, J.D. Gaynor, T.O. Oloya et T.W. Welacky. 1996. « Influence of controlled drainage-subirrigation on surface and tile drainage nitrate loss ». J. Environ. Qual. 25: 317-324.

Elliott, J.A., A.J. Cessna et D.W. Anderson. 1998. « Effect of tillage system on snowmelt runoff quality and quantity ». *Dans* « Proc. Ann. Meeting of the Amer. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Amer. and Soil Sci. Soc. Amer. », octobre 18-22, Baltimore, Md.

Environnement Canada. 2002a. Site Web sur l'eau douce : la gestion de l'eau : l'utilisation de l'eau : utilisations par prélèvement, 1991/96. Disponible à l'adresse Web http://www.ec.gc.ca/water/fr/manage/use/f_wuse.htm. Site visité le 6 mars 2003.

Environnement Canada. 2002b. Site Web sur l'eau douce : la gestion de l'eau : l'utilisation de l'eau - agriculture. Disponible à l'adresse Web http://www.ec.gc.ca/water/fr/manage/use/f_agri.htm. Site visité le 6 mars 2003.

Gaynor, J.D., C.S. Tan, C.F. Drury, T.W. Welacky, H.Y.F. Ng et W.D. Reynolds. 2002. « Runoff and drainage losses of atrazine, metribuzin and metolachlor in three water management systems ». J. Environ. Qual. 31: 300-308.

Irrigation Water Management Study Committee. 2002. « South Saskatchewan River basin: irrigation in the 21st century. Vol. 1: summary report ». Alberta Irrigation Projects Association, Lethbridge (Alberta).

Leith, R.M. et P.H. Whitfield. 1998. « Evidence of climate change effects on hydrology of streams in south-central B.C ». Can. Water Resour. J. 23: 219-230.

Madramootoo, C.A., T.G. Helwig et G.T. Dodds. 2001. « Managing water tables to improve drainage water quality in Quebec, Canada ». Transactions of the ASAE 44(6): 1511-1519.

McRae, T., C.A.S. Smith et L.J. Gregorich (s. la dir. de). 2000. L'agriculture écologiquement durable au Canada : Rapport sur le Projet des indicateurs agroenvironnementaux. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa (Ont.)

Milburn, P., J.A. MacLeod et S. Sanderson. 1997. « Control of fall nitrate leaching from early harvested potatoes on Prince Edward Island ». Can. Agric. Eng. 39: 263-271.

Neilsen, D. et G.H. Neilsen. 2002. « Efficient use of nitrogen and water in high density apple orchards ». Hort. Technol. 12: 19-25.

Neilsen, D., S. Smith, W. Koch, G. Frank, J. Hall et P. Parchomchuk. 2001. « Impact of climate change on crop water demand and crop suitability in the Okanagan Valley, British Columbia ». Tech. Bull. 01-15. Pacific Agri-Food Research Centre, Summerland (C.-B.). 32 p.

Parchomchuk, P., R.C. Berard et T.W. van der Gulik. 1996. « Automated irrigation scheduling using an electronic atmometer », p. 1099-1104. *Dans* C.R. Cramp, E.J. Sadler et R.E. Yoder (s. la dir. de), « Evapotranspiration and irrigation scheduling. ASAE Proc. Intl. Conf. », San Antonio, Tex.

Pesant, A.R., J.L. Dionne et J. Genest. 1987. « Soil and nutrient losses in surface runoff from conventional and no-till corn systems ». Can. J. Soil Sci. 67: 835-843.

Statistique Canada. 2002. Site Web www.statcan.ca, visité en 2002.

van der Gulik, T. Communication personnelle.

Whitfield, P.H. 2001. « Linked hydrologic and climate variations in British Columbia and Yukon ». Environ. Monit. Assess. 67: 217-238.

Chapitre 8

PRATIQUES ET CHANGEMENTS CONCERNANT L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE – FORESTERIE

Markus N. Thormann[1], Pierre Y. Bernier[2], Neil W. Foster[3], David W. Schindler[4] et Fred D. Beall[3]

[1] Ressources naturelles, Canada Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alb.)

[2] Ressources naturelles, Canada Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, Sainte-Foy (Qc)

[3] Ressources naturelles, Canada Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.)

[4] Université de l'Alberta, Département des sciences biologiques, Edmonton (Alb.)

Situation actuelle

Le Canada possède environ 10 % des ressources forestières (418 millions d'hectares) et environ 20 % des ressources en eau douce mondiales, mais ne compte environ que 7 % des ressources en eau douce disponibles de la planète (SCF, 2002; EC, 2003). Les forêts recyclent l'eau et la retournent dans l'atmosphère, diminuant de ce fait sa circulation dans les aquifères et les plans d'eau superficielle. De plus, elles filtrent l'air et l'eau, tempèrent le climat, offrent un habitat pour la faune, stabilisent le sol et constituent un volet dominant de l'économie, de la culture, des traditions et de l'histoire du Canada. Les bassins hydrographiques forestiers rendent donc un éventail de services importants à la société, y compris la fourniture d'une eau saine et le maintien d'écosystèmes aquatiques en santé. Ainsi, un certain nombre de grands centres urbains s'approvisionnent, partiellement ou totalement, dans des bassins hydrographiques forestiers. Les perturbations naturelles (défoliation causée par des insectes, incendies de forêt, etc.) et anthropiques (extinction des incendies et récolte du bois, p. ex.) peuvent modifier temporairement l'équilibre du cycle hydrologique en modifiant la dynamique de l'alimentation et de l'émergence des eaux souterraines, la position de la nappe phréatique et les régimes de débit des cours d'eau.

Mise à part la récolte du bois, les incendies et les infestations d'insectes constituent les principaux agents de renouvellement de la majorité des forêts canadiennes. Par exemple, les forêts boréales et maritimes de l'Est sont infestées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette environ aux 35 ans; les infestations donnent lieu à d'importants épisodes de renouvellement du peuplement et à d'importants écarts d'âge au sein de celui -ci. Comme les incendies de forêt sont soudains et qu'ils altèrent de façon prononcée la matière organique, leurs répercussions sur les cycles hydrologiques se manifestent plus rapidement que celles des infestations d'insectes. Les forêts boréales sont régulièrement la proie des flammes. Le cycle moyen des incendies est de 126 ans (CCMF, 2002) et leur fréquence varie de 63 à 185 ans (Bergeron, 1991; Larsen, 1997; Larsen et MacDonald, 1998). La fréquence des incendies est plus élevée dans les forêts de conifères du centre-ouest du Canada (le nord-ouest de l'Ontario, le Manitoba, la Saskatchewan et l'Alberta) et moins élevée dans les forêts plus humides du centre et de l'est du Canada (l'Ontario, le Québec et les provinces de l'Atlantique) ainsi que dans l'écozone maritime du Pacifique (fréquence moyenne de 770 ans) (Stocks et al., 2002). La fréquence est fonction de la qualité et du volume des matières combustibles, de la sécheresse ainsi que de conditions météorologiques. Parmi les conditions ayant une incidence sur le déclenchement et la propagation des incendies de forêt, mentionnons la vitesse du vent, les orages et la stabilité des systèmes atmosphériques. Au Canada, le centre - ouest est la région la plus sèche et la plus venteuse ainsi que celle où la fréquence des incendies est la plus élevée.

Le gouvernement du Canada a fortement appuyé la recherche en hydrologie forestière vers la fin des années 1960 et au début des années 1970, période qui porte le nom de « Décennie hydrologique internationale ». Pendant cette période, on a installé et utilisé des instruments de mesure dans beaucoup de bassins hydrographiques. On a aussi réalisé diverses études sur les répercussions les plus immédiates de la coupe à blanc sur le débit des cours d'eau et l'érosion. Les résultats de ces études ont servi à l'élaboration des pratiques de gestion forestière actuelles, dont le but est de protéger les sols et les ressources en eau douce du Canada. Bien que la plupart des opérations de récolte se déroulent encore en une seule étape (coupe à blanc), on a de plus en plus recours, au Canada, à des méthodes de coupe graduelle, entre autres la coupe de jardinage, la coupe progressive et la coupe avec réserve de semenciers. On a généralement diminué la superficie totale des zones de coupe à blanc et augmenté le nombre de bandes non exploitées (rideaux d'arbres) au sein des blocs de coupe, ce qui en a haussé l'hétérogénéité.

Au Canada, on dispose de peu de données comparables concernant les effets des incendies de forêt sur l'hy-

drologie des bassins hydrographiques (Schindler et al., 1980; Bayley et al., 1992), mais l'effet immédiat d'un incendie sur le débit des cours d'eau, sur le plan tant quantitatif que temporel, ressemble davantage à celui d'une coupe à blanc. On pourrait s'attendre à une telle similitude du fait que, dans les deux types de perturbations, la végétation qui transpire est éliminée, causant ainsi une baisse de l'évapotranspiration (Amiro et al., 1999; Amiro, 2001). Cependant, les différences entre la récolte et les incendies, notamment en ce qui a trait à l'interception des précipitations par des débris forestiers et à la régénération faisant suite aux perturbations, rendent les similitudes moins certaines.

Le présent chapitre expose les principaux effets de la récolte du bois et des incendies sur l'hydrologie forestière ainsi que les effets ultérieurs sur la disponibilité de l'eau douce en mettant l'accent sur la forêt boréale, la plus grande région forestière du Canada.

Tendances

Récolte du bois

Le territoire canadien couvre une superficie d'environ 922 millions d'hectares, dont environ 418 millions sont boisés. Les forêts commerciales (capables de produire des essences commerciales et d'offrir d'autres avantages) occupent une superficie d'environ 235 millions d'hectares, dont environ 119 millions sont l'objet d'une gestion et environ 1 million où se pratique annuellement la récolte du bois. C'est au Québec et en Colombie-Britannique que se trouvent les zones de récolte les plus importantes (superficies respectives de 349 113 hectares et de 204 472 hectares en 2000; CCMF, 2002). Soixante et onze pourcent des forêts canadiennes sont gérées par les gouvernements provinciaux, 23 % par le gouvernement fédéral et 6 % par des propriétaires fonciers privés. Les bois de résineux sont les plus exploités (86 % de la récolte totale de bois commercial en 1995); les principaux débouchés sont la production de pâtes et papiers et l'exportation. Cependant, la récolte de feuillus, qui servent principalement à la production de panneaux à copeaux orientés, de bois en placage lamellé, de meubles, de planchers, de contreplaqué et de moulures, était plus importante de 6 % entre 1990 et 1995 que la récolte moyenne de feuillus antérieure à 1990. Cette tendance reflète l'évolution de l'industrie des produits forestiers au cours des 25 dernières années, et l'on prévoit qu'elle se maintiendra. Les taux d'exploitation étaient inférieurs à ceux de la possibilité annuelle de coupe figurant dans les registres disponibles, c'est-à-dire ceux allant de 1970 à 1999 (CCMF, 2002).

Incendie de forêt au sud du lac 240, dans la région des lacs expérimentaux, dans le Nord-Ouest de l'Ontario.

Le Canada, qui autrefois approvisionnait les pays européens colonisateurs en produits forestiers, est maintenant un acteur de premier plan sur la scène internationale en matière de foresterie. Comme le pays évolue continuellement, il se produit des changements au chapitre de l'aménagement du territoire, y compris ceux découlant de l'urbanisation, de l'exploration pétrolière et gazière, de l'exploitation minière et de l'agriculture. Ces changements ont des répercussions sur les forêts du Canada, plus particulièrement dans la forêt boréale méridionale, la forêt carolinienne et la forêt-parc à trembles (CCMF, 2002). Cependant, bien que l'on perde certaines des forêts situées près des centres urbains, on compte un nombre croissant de zones boisées sur les terres agricoles marginales et dans les zones urbaines, que l'on a baptisées « forêts urbaines » (CCMF, 2002).

Les règlements sur la récolte de bois en vigueur dans les provinces et les territoires ont généralement pour but d'assurer la productivité des ressources forestières. Après la coupe, on laisse libre cours à la régénération naturelle dans la plupart des zones exploitées; les autres font l'objet d'un ensemencement et d'une plantation actives (SCF, 2002). L'étendue de l'ensemencement et de la plantation varie largement en fonction de l'état des forêts et des politiques provinciales et territoriales. Depuis 1975, les pratiques forestières adoptées par les provinces et les territoires ont permis la régénération de 90 % des sites exploités dans un délai de 10 ans après la récolte, ce qui assure la viabilité à long terme des forêts au Canada.

Incendies

La fréquence des incendies dans les forêts boréales du Canada a diminué de la fin du petit âge glaciaire, vers

1850, jusqu'au milieu du 20e siècle, et ce, malgré une tendance générale au réchauffement (Flannigan et al., 1998). De 1960 à 1995, la tendance s'est renversée et la fréquence des incendies était plus importante de 60 % qu'au cours des 40 années précédentes (1920 –1960) (Amiro et al., 2001a). En moyenne, 9 000 incendies ravagent environ 2 millions d'hectares de forêts par année (1958 à 2000), dont environ la moitié sont productives. Cependant, d'une année à l'autre, la superficie totale peut varier par un facteur de 10 et plus; cette variabilité était particulièrement évidente dans les années 1990 (Amiro et al., 2002). La majorité des incendies couvrent une superficie inférieure à 10 hectares, et seulement 1,5 % de la totalité détruisent une superficie supérieure à 1 000 hectares. Ces grands incendies sont responsables de 93 % de la superficie totale brûlée. On considère qu'environ 80 % des forêts brûlées sont non productives sur le plan commercial. La récupération des arbres détruits par le feu dans des zones accessibles est une pratique courante. Tout comme dans le cas des forêts exploitées, on laisse d'ordinaire le temps aux forêts brûlées de se régénérer naturellement.

Changements climatiques

En raison du changement climatique mondial, la fréquence des incendies dans la forêt boréale du centre-ouest du Canada peut augmenter, car on y prévoit des conditions plus sèches et plus chaudes (Flannigan et al., 1998; Amiro et al., 2001a). Or, il est possible que ces phénomènes touchent aussi l'atmosphère. Au Canada, les émissions produites par les incendies de forêt équivalent déjà en moyenne à 18 % des émissions actuelles de dioxyde de carbone (CO_2) produites par le secteur énergétique – cette proportion passe à 75 % pendant les années d'incendies records (Amiro et al., 2001b).

Effets des perturbations sur la quantité d'eau et les régimes hydriques

Des recherches ont montré que les niveaux des nappes phréatiques, le volume et le régime des débits dans les cours d'eau, la qualité de l'eau, l'érosion, la sédimentation et, probablement, la dynamique de l'alimentation et de l'émergence des eaux souterraines à l'échelle locale représentent les changements les plus importants à survenir après une récolte dans les bassins hydrographiques forestiers. Or, des changements semblables peuvent survenir après un incendie. Cependant, les effets sur les bassins hydrographiques diffèrent si on compare les pratiques forestières et les autres aménagements du territoire, y compris l'agriculture et l'exploitation minière.

Le cycle hydrologique est composé des éléments principaux suivants : les précipitations; le débit et le stockage des eaux superficielles et souterraines; l'évaporation à partir des sols, de la végétation, des lacs, des cours d'eau et des océans. L'ampleur de la couverture forestière ainsi que la santé et la maturité des forêts ont une incidence sur le mouvement des eaux de pluie vers les eaux superficielles et souterraines. L'évapotranspiration est le processus par lequel l'eau s'évapore du sol et des plantes et monte dans l'atmosphère. Dans la forêt boréale du centre-ouest du Canada, une partie importante (entre 66 et 82 %) des eaux de pluie annuelles retourne dans l'atmosphère par évapotranspiration (Lieffers et Rothwell, 1986), tandis que dans les zones plus humides, y compris celle du centre du Québec, cette proportion est de seulement environ un tiers (Guillemette et al., 1999).

La disparition de la végétation découlant de la récolte du bois ou des incendies de forêt de haute intensité causent des diminutions de courte durée et importantes des pertes d'eau par évapotranspiration et des baisses de l'interception des eaux pluviales, ce qui, dans l'ensemble, accroît la teneur en eau du sol dans les zones perturbées. Cependant, les caractéristiques géophysiques et climatiques locales varient dans les écozones du Canada. Les effets de la récolte du bois et des incendies sur les régimes de débit de cours d'eau diffèrent donc aussi à la grandeur du pays.

La couverture forestière maintient la capacité d'infiltration du sol, diminue le ruissellement, réduit la vitesse du vent et augmente l'interception des eaux de pluie, ce qui a localement une incidence considérable sur le microclimat et le cycle hydrologique. Le boisement – à savoir la conversion directe par l'être humain de terres non boisées pendant au moins 50 ans en des terres forestières par la plantation, l'ensemencement ou la promotion de l'ensemencement naturel – a des répercussions sur le cycle hydrologique à l'échelle locale. Entre autres, il augmente l'évapotranspiration, abaisse le niveau des nappes phréatiques, maintient la capacité d'infiltration du sol et diminue le ruissellement. Bien que la consommation en eau des arbres soit appréciable, le boisement peut atténuer les conditions locales de sécheresse dans certaines circonstances; cependant, les données canadiennes sur ce sujet sont limitées (Buttle, 1996). En outre, certaines essences d'arbres peuvent être employées comme biorestaurateurs; elles atténuent les effets de la pollution par un processus appelé « phytoremédiation ». Ces arbres peuvent intercepter des polluants, les éliminer des écosystèmes terrestres contaminés et, de ce fait, les empêcher d'atteindre les écosystèmes aquatiques (Dietz et Schnoor, 2001).

Le Canada, qui effectue des recherches sur les bassins hydrographiques et en assure la surveillance depuis longtemps, a appris comment gérer les forêts pour accroître l'apport en eau et ainsi répondre à de nombreux besoins. En effet, depuis les années 1960, on effectue d'importantes manipulations des bassins hydrographiques, à l'échelle régionale et expérimentale, pour étudier les effets des activités de gestion forestière sur le débits de cours d'eau (Berry, 1991). Ces approches ont permis d'améliorer grandement nos connaissances

des processus biologiques et physiques qui régissent l'hydrologie des bassins hydrographiques et ont contribué à l'élaboration et à l'application de meilleures pratiques d'aménagement du territoire. Dans certaines régions, les résultats scientifiques ont servi à orienter la planification et la prise de décisions en ce qui touche la conservation et la restauration des forêts riveraines, des milieux humides, de l'habitat faunique, de l'habitat des cours d'eau et des berges; ils ont aussi servi à limiter les répercussions des routes sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau. Cependant, dans d'autres régions, particulièrement celles de la forêt boréale méridionale, la construction de routes et de chemins de fer a isolé des zones importantes de forêt riveraine et de milieux humides et a eu des conséquences négatives appréciables sur celles-ci (Poff et al., 1997).

Les études en foresterie ont avant tout permis de constater que la sédimentation était grandement attribuable à la construction et à l'utilisation de chemins forestiers ainsi qu'aux perturbations directes sur les berges causées par la machinerie (Mattice, 1977). Au Canada, on a apporté des changements aux pratiques forestières pour réduire au minimum ces répercussions; parmi ces changements, mentionnons l'aménagement de bandes tampons le long des berges, l'apport de modifications aux méthodes de construction des routes (gestion des eaux superficielles, emplacement et dimensions des ponceaux et des ouvrages de franchissement des cours d'eau) (Ottens et Rudd, 1977). Selon des études, les apports de sédiments dans les cours d'eau attribuables aux opérations forestières sont de courte durée et souvent minimes lorsque les règlements sont respectés (Plamondon, 1982). La protection des sols et le rétablissement des sites exploités peuvent se révéler plus problématiques sur les pentes raides des zones où les précipitations sont fortes et le sol instable. Cependant, même dans les conditions extrêmes que présentent les forêts de l'île de Vancouver et des îles de la Reine-Charlotte, l'érosion des sols nus est un facteur minime et très variable quant à la sédimentation des cours d'eau, comparativement aux glissements de terrain et autres phénomènes du genre survenant dans les zones exploitées et non exploitées (Roberts et Church, 1986; Hetherington, 1992). Dans les deux types d'emplacements, les facteurs climatiques et physiques ont influé grandement sur le degré de production et de transport des sédiments dans les cours d'eau.

Effets sur l'alimentation et l'émergence des eaux souterraines

La récolte du bois peut avoir des répercussions positives et négatives sur les eaux souterraines. Une hausse de l'alimentation en eau des eaux souterraines attribuable à la diminution temporaire de l'évapotranspiration est un exemple de répercussions négatives. Cette répercussion peut se révéler plus importante dans les zones sèches où l'alimentation des eaux souterraines est minimale en raison d'une couverture forestière dense. En revanche, l'incidence est moindre lorsque l'alimentation est considérable. L'exploitation forestière peut avoir des répercussions négatives sur la circulation des eaux souterraines dans les pentes raides lorsque des routes peuvent intercepter l'écoulement latéral et diriger les eaux vers le réseau d'égouttement superficiel. L'eau peut alors s'échapper du réseau d'égouttement à travers l'écoulement superficiel et causer une très forte érosion du sol. Ces répercussions négatives sont probablement locales et mineures (Hetherington, 1992); les répercussions possibles sur la stabilité des pentes se révèlent plus importantes dans ces cas.

Changements des niveaux des nappes phréatiques

Les zones boréales comportent de grandes étendues de milieux humides boisés en raison du relief relativement plat, d'une abondance de dépôts surficiels mal égouttés, d'une roche-mère peu profonde imperméable ainsi que d'un climat frais et humide (Vitt et al ., 2000). Dans ces zones, l'abondance des précipitations et la position de la nappe phréatique avant la récolte du bois influent sur l'effet qu'aura celle-ci sur l'hydrologie du bloc de coupe (zone où le bois doit être ou a été coupé) (Dubé et al., 1995). La profondeur à laquelle se trouve la nappe phréatique constitue un facteur écologique important, mais non linéaire. Les hausses fréquentes de la nappe phréatique jusqu'à ses hauts niveaux peuvent influer grandement sur la croissance des arbres et la trajectoire de la dynamique de la végétation après la perturbation.

Les niveaux d'eau sont habituellement élevés après la fonte des neiges et diminuent au cours de l'été lorsque l'évapotranspiration est à son niveau le plus élevé. Pendant des périodes de fortes pluies et après la fonte des neiges, la nappe phréatique se trouve près de la surface du sol des milieux humides boisés. La coupe des arbres diminue les pertes par évapotranspiration, donnant ainsi lieu à une baisse moins prononcée de la nappe phréatique pendant des périodes de pluies faibles. La différence entre les niveaux d'eau saisonniers maximaux et minimaux est donc moins considérable dans les zones exploitées que dans les zones non exploitées (Dubé et al., 1995). Les effets de la récolte sur l'hydrologie se limitent généralement au bloc de coupe lui-même et ne se propagent pas aux peuplements forestiers adjacents demeurés intacts, peu importe l'emplacement et les dimensions du bloc de coupe. En général, les niveaux des nappes phréatiques reviennent à la normale dans les dix premiers mètres du peuplement forestier intact (Dubé et al., 1995). Les effets de la hausse de la nappe phréatique sont plus considérables près du centre du bloc de coupe. Il se produirait un écoulement latéral depuis le milieu de celui-ci vers les zones naturelles périphériques, créant ainsi des fluctuations inégales de la nappe phréatique dans l'ensemble

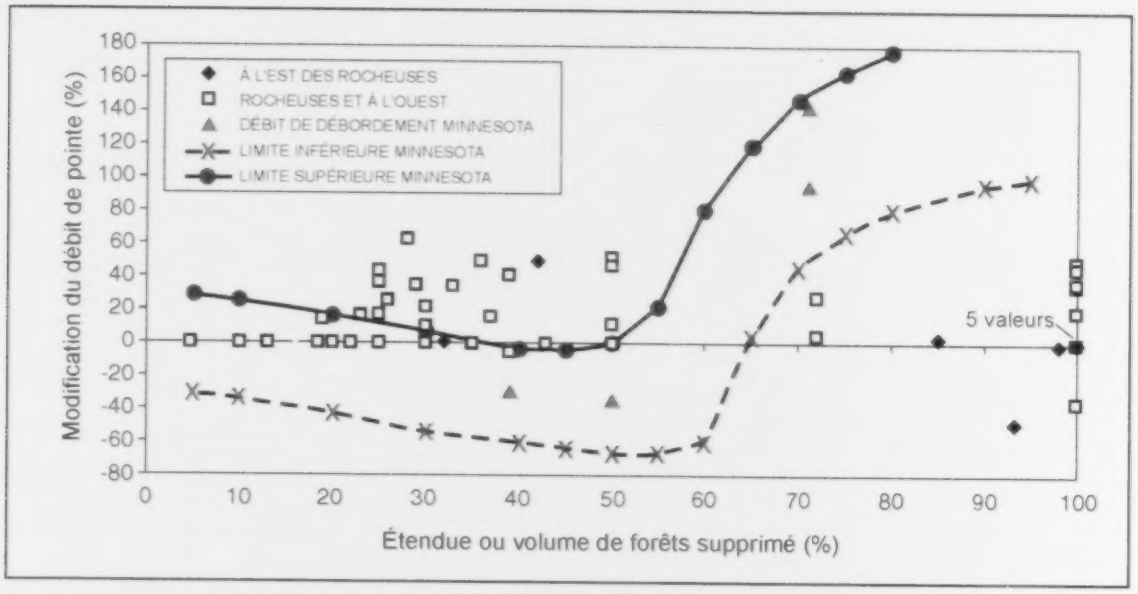


Figure 1. Modification du débit au-delà du débit de débordement causé par la fonte des neiges en fonction du déboisement (exploitation forestière, incendies ou infestation d'insectes) en Amérique du Nord. Adapté de Verry (1986) et de Plamondon (1993, 2002). Les limites supérieures et inférieures représentent une hypothèse généralisée de l'effet de la fonte des neiges sur le débit de pointe au Minnesota (Verry, 1986).

du bloc. Bien que les effets de la hausse de la nappe phréatique puissent s'améliorer sur de courtes distances dans les peuplements forestiers naturels avoisinants, le ruissellement provenant du bloc de coupe peut avoir des répercussions significatives sur l'hydrologie du bassin hydrographique.

À l'instar des changements des niveaux de la nappe phréatique dans les blocs de coupe, la dynamique des gaz à effet de serre dans les forêts peut aussi être modifiée. Par exemple, les sols hétérogènes bien égouttés peuvent servir de puits de carbone (Whalen et Reeburgh, 1996). Cependant, la récolte du bois peut saturer les sols minéraux et organiques mal égouttés, lesquels peuvent alors devenir des sources importantes de carbone sous forme de méthane (Roulet et Moore, 1995).

Effets sur le volume des débits des cours d'eau

La récolte du bois, qui réduit l'interception des eaux pluviales et les pertes par évapotranspiration, accroît l'écoulement de l'eau hors des bassins hydrographiques. L'ampleur de cet effet est fonction de la perte par évapotranspiration par unité de terrain, laquelle est tributaire de la disponibilité de l'eau, de la demande évaporative et, dans une moindre mesure, du type de végétation. Les hausses absolues du volume des débits des cours d'eau sont plus élevées dans les zones chaudes et humides et moins élevées dans les zones fraîches et sèches. Les hausses relatives des débits des cours d'eau sont plus importantes dans les zones sèches que dans les zones humides. Selon les études menées par Hornbeck et al. (1997) dans la forêt tempérée de feuillus de l'Est, la plupart des hausses des apports d'eau sont attribuables à l'accroissement des débits minimaux estivaux. Cependant, la réduction de l'interception de la neige à la suite de la récolte de résineux dans les zones plus humides de la forêt boréale peut avoir un effet plus important sur l'apport annuel d'eau que n'importe quelle diminution des débits d'été (Guillemette et al., 1999).

Les hausses de l'apport d'eau annuel attribuables aux opérations de coupe à blanc vont de 160 millimètres à Kenora, en Ontario (Nicolson et al., 1982), à 349 millimètres au ruisseau Carnation sur l'île de Vancouver, en Colombie-Britannique (Hartman et Scrivener, 1990). Les perturbations forestières au lac Rawson, en Ontario, causées par le vent et les incendies, ont aussi accru le volume des débits des cours d'eau d'environ 170 millimètres (Schindler et al., 1980). Les grands incendies perturbent une grande proportion de bassins plus importants en l'espace de quelques jours. Les répercussions absolues à court terme des grands incendies sur l'apport d'eau peuvent donc être plus appréciables que celles d'une récolte échelonnée sur de nombreuses années dans un bassin donné.

Dans un bassin, les hausses de l'apport d'eau sont environ proportionnelles à la zone exploitée. Selon Buttle et Metcalfe (2000), les répercussions des diverses méthodes de récolte sur l'hydrologie des cours d'eau sont jugées minimes si moins de 25 % de la superficie du bassin hydrographique est exploitée. Selon les auteurs, ce phénomène serait partiellement attribuable à la capacité des bassins plus grands d'atténuer les effets hydrologiques de perturbations récentes d'importance relativement

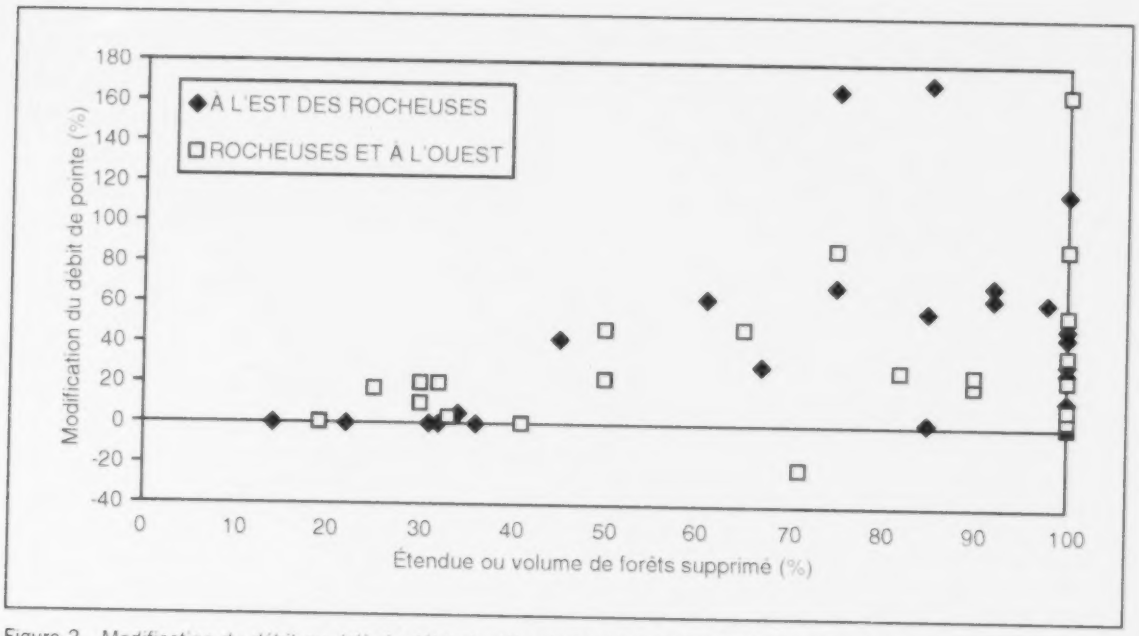


Figure 2. Modification du débit au-delà du débit de débordement causé par la pluie en fonction du déboisement (exploitation forestière, incendies ou infestation d'insectes) en Amérique du Nord. Adapté de Plamondon (1993, 2002).

limitée en milieu forestier. La durée des effets de la coupe ou de la mort d'arbres sur l'apport d'eau est fonction de la vitesse de rétablissement de la végétation et peut varier de 7 à 30 ans (Swanson et Hillman, 1977).

Effets sur le régime de débit des cours d'eau

La coupe d'arbres accroît le débit des cours d'eau, ce qui est bénéfique pour les petits cours d'eau où la faiblesse du débit impose des contraintes à l'écosystème aquatique. Le débit de pointe causé par la fonte des neiges est la principale particularité hydrologique de la majorité des bassins hydrographiques boréaux et subalpins. L'exploitation forestière a un effet direct sur la fonte des neiges et, de ce fait, sur le débit de pointe printanier (Whitaker et al., 2002), mais cet effet est très variable (figure 1). Le débit, lorsqu'il excède le débit de débordement (débit maximal enregistré tout juste avant le débordement d'un cours d'eau dans la plaine d'inondation [à intervalle de 1,5 an]), jouerait un rôle déterminant dans la morphologie des cours d'eau (Dunne et Leopold, 1978). Selon les résultats d'études menées sur des bassins jumelés, on peut hausser ce débit de 50 % si on enlève plus de 25 % de la zone forestière ou du volume d'arbres (figure 1). Les répercussions de l'enlèvement de la couverture forestière sur le débit de pointe peuvent prendre plus d'ampleur si l'orientation angulaire du bassin par rapport au soleil est uniforme dans l'ensemble du bassin. Cependant, selon le modèle proposé de changement du débit de pointe pour le Minnesota (Verry, 1986), un État américain semblable au nord-ouest de l'Ontario, le débit de pointe causé par la fonte des neiges risque de se produire si on coupe plus de 50 à 60 % des arbres. Si l'on récolte moins de 50 % des arbres, il se produit une désynchronisation de la fonte des neiges entre les zones découvertes et les zones boisées et une diminution du débit de pointe.

La hausse du débit de débordement provoquée par la pluie (figure 2) est davantage fonction du nombre d'arbres coupés, ce qui n'est pas le cas avec la hausse du débit de pointe causé par la fonte des neiges. La hausse du débit de pointe après un épisode de pluie est principalement attribuable à une augmentation de la teneur en eau du sol, laquelle devrait être en corrélation étroite avec le pourcentage d'arbres coupés. Les perturbations du sol, entre autres l'aménagement de routes et de pistes de débardage, peuvent hausser ou diminuer le débit de pointe, selon la durée entre les courants pulsés d'eau produits par les sources des bassins hydrographiques et les zones perturbées. L'ampleur des répercussions diminue en fonction du degré de fermeture du couvert. En outre, les répercussions de la récolte sont moins importantes dans les forêts de feuillus que dans les forêts de conifères du fait que les pertes causées par l'interception sont moins élevées pendant la saison morte, où les arbres n'ont pas de feuilles.

Pendant l'été, la récolte du bois favorise généralement l'augmentation des débits réduits en raison de la hausse des nappes phréatiques découlant de la diminution de l'interception des précipitations et de l'évapotranspiration (Dubé et al., 1995). Les précipitations estivales peuvent entraîner une hausse, faible ou moyenne, du débit d'orage et de pointe dans les zones exploitées comparativement aux zones dans les bassins boisés (Pomeroy et

al., 1997) en raison de la présence de sols généralement plus humides dans les zones exploitées (diminution de l'évapotranspiration); la saturation du sol en bordure des cours d'eau et les débits peuvent donc être accrus.

Autant l'effet de la hausse du débit sur les cours d'eau primaires peut être considérable, autant les effets cumulatifs sur les cours d'eau secondaires et tertiaires peuvent être négligeables. En outre, comme les effets sont secondaires à l'échelle du bassin hydrographique, les répercussions probables de la foresterie sur les inondations en aval peuvent l'être également (Martin et al., 2000). Cette situation diffère entièrement des situations où il y a un changement dans l'aménagement du territoire, lesquels modifient l'écosystème de façon permanente. Par exemple, la conversion permanente de la couverture forestière sur plus de 27 % de la superficie du bassin hydrographique (95 000 km^2) situé au-dessus de Saint Paul, au Minnesota, a fait augmenter les pointes de crue annuelles de 43 % (Miller et Frink, 1982).

La coupe d'arbres en bordure des cours d'eau et la construction de routes peuvent avoir des effets considérables sur le biote aquatique. Selon la situation, l'exploitation forestière peut avoir des répercussions positives ou négatives sur la morphologie des cours d'eau et l'habitat du poisson (Ralph et al., 1994). Même l'enlèvement partiel de la végétation riveraine peut accroître la température de l'eau et l'exposition des cours d'eau aux rayons ultraviolets. La température élevée et l'exposition accrue aux rayons ultraviolets produisent des changements au niveau des communautés d'invertébrés vivant dans les cours d'eau (Kelly et al., 2003) et, conjuguées à la hausse des concentrations d'éléments nutritifs découlant de la récolte du bois, favorisent la prolifération d'algues indésirables. Les ponceaux installés de façon inappropriée sur les chemins d'exploitation bloquent souvent le passage aux poissons; ils constituent des obstacles impossibles à surmonter ou accentuent la vitesse du courant, le rendant ainsi difficile à remonter.

Il est souvent difficile de dissocier les effets qu'ont la récolte du bois et les incendies de forêt sur les propriétés des lac s et des cours d'eau de ceux du climat, même dans le cadre d'études bien conçues avec bassins témoins (Schindler et al., 1996; Steedman et Kushneriuk, 2000). La perte d'arbres en bordure de petits lacs attribuable à des perturbations naturelles ou à la récolte accentue la vitesse du vent au-dessus de l'eau; en outre, elle augmente (France, 1997) ou diminue (Steedman et Kushneriuk, 2000) l'épaisseur de la thermocline. L'aménagement de bandes tampons empêche l'accentuation de la vitesse du vent au-dessus de l'eau (Steedman et Kushneriuk, 2000). Selon Schindler et al. (1996), les eaux lacustres deviennent plus claires après des incendies qui se déclarent pendant des périodes sèches accompagnées d'une baisse des précipitations et de débit d'eau vers les lacs. Toutefois, Steedman et Kushneriuk (2000) sont d'avis contraire. Selon eux, l'eau est moins claire après la récolte, mais ils mentionnent que les effets peuvent être liés au climat.

Une hausse de l'apport de sédiments dans les lacs à la suite d'un incendie ou d'une coupe peut envaser les frayères et nuire à l'habitat des poissons et d'autres organismes d'eau douce (Beaty, 1994). Ces problèmes amènent à une conclusion, à savoir qu'il faut s'assurer de l'entretien et du renforcement des mesures nécessaires pour prévenir l'érosion et la sédimentation pendant la récolte du bois. Cependant, il n'existe toujours pas de règles précises permettant de déterminer les seuils d'érosion et d'envasement qui ne porteraient pas atteinte aux populations de poissons. Ainsi, selon les résultats d'une simulation d'envasement réalisée par Gunn et Sein (2000), les populations de truites de lac ne seraient pas perturbées par la réduction importante de leur lieu de frai. Par contre, ces mêmes populations sont profondément affectées par la fréquentation accrue des lieux découlant de l'aménagement de routes et la pression de la pêche qui a suivi. Murphy et al. (1986) ont démontré que la présence de bandes tampons adéquates préservait ou augmentait l'habitat ou la productivité des populations de poissons et que l'élimination de ces bandes avait une incidence négative sur ces variables. La modification des régimes d'écoulement de l'eau dans les zones exploitées au-delà des bandes tampons peut également avoir un effet sur les frayères des truites (Curry et Devito, 1996), bien qu'il ne semble exister aucune preuve scientifique directe de l'ampleur de ces effets sur le succès de la fraye des truites.

Changements de l'aménagement du territoire

Au Canada, on a transformé d'importantes superficies boisées en des terres destinées à des utilisations urbaines et agricoles. Les changements qui ont marqué les composantes naturelles du cycle hydrologique à la suite de la modification de l'aménagement du territoire ont eu des répercussions majeures sur les volumes d'eau, la qualité de l'eau et les régimes d'écoulement. Or, on distingue mal les effets de l'exploitation forestière sur les ressources en eau des effets des changements concernant l'aménagement du territoire. Les recherches en hydrologie effectuées au Canada et dans le monde ont démontré le rôle important que jouent les forêts et les autres terres non cultivées dans la régulation du débit des cours d'eau et la préservation de la qualité de l'eau. Les répercussions de la récolte des arbres sur le régime des débits des cours d'eau et la qualité de l'eau sont habituellement de courte durée et de moindre importance que celles attribuables aux changements touchant l'aménagement du territoire, à condition que les sols forestiers soient protégés et que la repousse de la végétation soit rapide.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Les forêts sont de plus en plus mises à contribution pour fournir l'eau non contaminée nécessaire à diverses utilisations, notamment la pêche, l'agriculture et les loisirs. Il faut donc poursuivre les recherches sur les questions actuelles et nouvelles en lien avec le volume et la qualité des ressources en eau douce au Canada. Il importe également de mieux connaître et comprendre les liens qui existent entre la forêt et l'eau afin d'intégrer la problématique de l'eau dans les processus décisionnels forestiers et connexes; il faut aussi renforcer les critères relatifs au volume et à la qualité des ressources hydriques appliqués aux pratiques de gestion forestière durable.

En 2001, le Service canadien des forêts a répertorié les possibilités de recherche dans le domaine de l'hydrologie forestière (Beall et al., 2001). Un certain nombre de sujets généraux ont été relevés et groupés sous trois thèmes associés à la disponibilité de l'eau douce. Aucune liste des priorités n'a été établie, et les liens avec les données disponibles ne sont pas achevés. Cependant, les thèmes et les résultats de cette initiative conviennent au présent exercice. Les voici.

- Effets de l'état des forêts, des perturbations naturelles et des activités forestières
  - Effets de la récolte du bois sur les quantités d'eau.
  - Effets des incendies de forêt, des invasions d'insectes et de l'état des forêts (forêts en régénération par opposition aux forêts anciennes, p. ex.) sur les quantités d'eau.
  - Effets d'une gestion forestière intensive sur les ressources en eaux superficielles et souterraines.
  - Élaboration de pratiques de gestion forestière pour préserver ou augmenter les ressources en eau.
  - Effets découlant de la gestion forestière et des perturbations sur l'habitat, la productivité et la diversité de l'écosystème aquatique des forêts
- Effets de la variabilité et des changements climatiques
  - Effets de la variabilité et des changements climatiques sur les cycles hydrologiques des forêts.
  - Répercussions sur l'approvisionnement en eau provenant de zones boisées (temps et quantité).
  - Répercussions sur l'intégrité écologique des écosystèmes aquatiques.
- Synthèse et intégration
  - Élaboration et adaptation de modèles empiriques et de modèles sur les processus nationaux et des grands bassins qui intègrent les cycles hydrologiques et biogéochimiques afin d'améliorer la prévisibilité et de faciliter la prise de décisions.
  - Récupération, évaluation et archivage d'ensembles de données à long terme pour élaborer et valider des modèles et pour établir une base de données nationale.
  - Extrapolation de résultats des études dans des parcelles et des boisés à l'échelle du paysage et régionale.
  - Extrapolation de modèles climatiques régionaux pour obtenir des scénarios réalistes servant à alimenter des modèles sur les processus.
  - Détermination des coûts et des avantages socio-économiques des régimes hydrologiques forestiers altérés par des perturbations naturelles et anthropiques.

La variabilité importante des perturbations liées à la récolte et à la préparation du terrain, de l'intensité des incendies de forêt dans les bassins hydrographiques et des écozones du Canada explique l'écart considérable constaté entre les réactions de chaque substance nutritive et de chaque élément aux perturbations anthropiques et naturelles. La plupart des études menées sur des bassins hydrographiques se sont déroulées près de l'extrémité sud de la forêt boréale, et la majorité d'entre elles ont eu lieu dans des provinces du centre et de l'est du Canada (l'Ontario et le Québec). La pertinence des résultats obtenus dans l'est du Canada pour d'autres régions du pays où prédominent des conditions pédologiques et physiographiques différentes est encore hypothétique et justifie des recherches plus approfondies (Buttle et al., 2000). Bien que la recherche en hydrologie ait pris plus d'ampleur au cours des trois à cinq dernières années au Canada, les résultats n'ont pas été largement diffusés ou font encore l'objet d'analyses. Beaucoup de gestionnaires forestiers doivent avoir recours aux résultats d'études réalisées à de plus petites échelles et portant sur des milieux forestiers qui ne sont pas nécessairement pertinents dans le contexte canadien (J.M. Buttle, comm. pers.).

Références

Amiro, B.D. 2001. « Paired-tower measurements of carbon and energy fluxes following disturbance in the boreal forest ». Glob. Change Biol. 7: 253-268.

Amiro, B.D., M.D. Flannigan, B.J. Stocks et B.M. Wotton. 2002. « Perspectives on carbon emissions from Canadian forest fires ». For. Chron. 78: 388-390.

Amiro, B.D., J.I. MacPherson et R.L. Desjardins. 1999. « BOREAS flight measurements of forest-fire effects on carbon dioxide and energy fluxes ». Agric. For. Meteorol. 96: 199-208.

Amiro, B.D., B.J. Stocks, M.E. Alexander, M.D. Flannigan et B.M. Wotton. 2001a. « Fire, climate change, carbon and fuel management in the Canadian boreal forest ». Int. J. Wildland Fire 10: 405-413.

Amiro, B.D., J.B. Todd, B.M. Wotton, K.A. Logan, M.D. Flannigan, B.J. Stocks, J.A. Mason, D.L. Martell et K.G. Hirsch. 2001b. « Direct carbon emissions from Canadian forest fires, 1959-1999 ». Can. J. For. Res. 31: 512-525.

Bayley, S.E., D.W. Schindler, K.G. Beaty, B.R. Parker et

M.P. Stainton. 1992. « Effects of multiple fires on nutrient yields from streams draining boreal forest and fen watersheds: nitrogen and phosphorus ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 49: 584-596.

Beall, F., R. Stewart, I. Campbell, C. Campbell, H. Hirvonen et P. Bernier. 2001. Document d'orientation du SCF - Ressources en eau de la forêt. Res. Nat. Can., Serv. Can. For., Ottawa (Ont., Canada.

Beaty, K.G. 1994. « Sediment transport in a small stream following two successive forest fires ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 51: 2723-2733.

Bergeron, Y. 1991. « The influence of island and mainland lakeshore landscapes on boreal forest fire regimes ». Ecology 72: 1980-1992.

Berry, G.J. 1991. « Hydrology of drained and undrained black spruce peatlands: streamflow and hydrologic balance. Forest Information Systems Ltd., Victoria, B.C., Canada ». COFRDA Rep. 3317.

Buttle, J.M. 1996. « Identifying hydrological responses to basin restoration: an example from southern Ontario ». *Dans* McDonnell, J.J., J.B. Stribling, L.R. Neville et D.J. Leopold (s. la dir. de), « Watershed restoration management: physical, chemical, and biological considerations ». Amer. Water Res. Assoc., Herndon, Va., Etats-Unis. TPS-96-1.

Buttle, J.M., I.F. Creed et J.W. Pomeroy. 2000. « Advances in Canadian forest hydrology, 1995-1998 ». Hydrolog. Process. 14: 1551-1578.

Buttle, J.M. et R.A. Metcalfe. 2000. « Boreal forest disturbance and streamflow response, northeastern Ontario ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 57(Suppl. 2): 5-18.

CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). 2002. Abrégé de statistiques forestières canadiennes. Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ont.), Canada.

Curry, R.A. et K. Devito. 1996. « Hydrogeology of brook trout (Salvelinus fontinalis) spawning and incubation habitats: implications for forestry and land use development ». Can. J. For. Res. 26: 767-772.

Dietz, A.C. et J.L. Schnoor. 2001. « Advances in phytoremediation ». Environ. Health Perspect. 109(Suppl. 1): 163-168.

Dubé, S., A.P. Plamondon et R.L. Rothwell. 1995. « Watering up after clear-cutting on forested wetlands of the St. Lawrence lowland ». Water Resour. Res. 31: 1741-1750.

Dunne, Y. et L.B. Leopold. 1978. « Water in environmental planning ». W.H. Freeman & Co., San Francisco, Ca., États-Unis.

EC (Environnement Canada). 2003. Site Web sur l'eau douce. Environnement Canada, Ottawa (Ont.), Canada. Disponible à l'adresse Web http://www.ec.gc.ca/water/f_main.html. Site visité le 15 septembre 2003.

Flannigan, M.D., Y. Bergeron, O. Engelmark et B.M. Wotton. 1998. « Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming ». J. Veg. Sci. 9: 469-476.

France, R. 1997. « Land-water linkages: influence of riparian deforestation on lake thermocline depth and possible consequences for cold stenotherms ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 54: 1299-1305.

Guillemette, F., A.P. Plamondon et D. Levesque. 1999. Effets de la coupe sur le bilan hydrologique. Bassin expérimental du ruisseau des Eaux-Volées (BEREV). Département des sciences du bois et de la forêt. Université Laval (Québec), Canada.

Gunn, J.M. et R. Sein. 2000. « Effects of forestry roads on reproductive habitat and exploitation of lake trout (Salvelinus namaycush) in three experimental lakes ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 57(Suppl. 2): 97-104.

Hartman, G.F. et J.C. Scrivener. 1990. « Impacts of forestry practices on a coastal stream ecosystem, Carnation Creek, British Columbia ». Can. Bull. Fish. Aquat. Sci., No. 223.

Hetherington, E.D. 1992. « Watershed hydrology », p. 33-47. *Dans* Hogan, D.L., P.J. Tschaplinski et S. Chatwin (s. la dir. de), « Carnation Creek and the Queen Charlotte Islands fish/forestry workshop: applying 20 years of coast research to management solutions ». B.C. Min. For. Res. Program, Victoria (C.-B.), Canada.

Hornbeck, J.W., C.W. Martin et C. Eagar. 1997. « Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire ». Can. J. For. Res. 27: 2043-2052.

Kelly, D.J., M.L. Bothwell et D.W. Schindler. 2003. « Effects of solar radiation on stream benthic communities: an intersite comparison ». Ecology 84: 2724-2740.

Larsen, C.P.S. 1997. « Spatial and temporal variations in boreal forest fire frequency in northern Alberta ». J. Biogeogr. 24: 663-674.

Larsen, C.P.S. et G.M. MacDonald. 1998. « An 840-year record of fire and vegetation in a boreal white spruce forest ». Ecology 79: 106-118.

Lieffers, V.J. et R.L. Rothwell. 1986. « Effects of depth of water table and substrate temperature on root and top growth of Picea mariana and Larix laricina seedlings ». Can. J. For. Res. 16: 1201-1206.

Martin, C.W., J.W. Hornbeck, G.E. Likens et D.C. Buso. 2000. « Impact of intensive harvesting on hydrology and nutrient dynamics of northern hardwood forests ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 57(Suppl. 2): 19-29.

Mattice, C.R. 1977. « Forest road erosion in northern Ontario: a preliminary analysis ». Forêts Canada, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ont.), Canada. Inf. Rep. O-X-254.

Miller, J. et D.L. Frink. 1982. « Changes in flood response in the Red River of the North Basin, North Dakota-Minnesota ». U.S. Geol. Surv., Bismarck, N.D., Etats-Unis. Open File Rep. 82-774.

Murphy, M.L., J. Heifetz, S.W. Johnson, K.V. Koski et J.F Thedinga. 1986. « Effects of clear-cut logging with and without buffer strips on juvenile salmonids in Alaskan streams ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 43: 1521-1533.

Nicolson, J.A., N.W. Foster et I.K. Morrison. 1982. « Forest harvesting effects on water quality and nutrient status in the boreal forest », p. 71-89. *Dans* Steed, G.L. et H.R. Hudson (s. la dir. de), « Proc. Can. Hydrol. Symp. '82 – Hydrologic processes of forested areas ». Nat. Res. Counc. Can., Ottawa (Ont.), Canada.

Ottens, J. et J. Rudd. 1977. « Environmental protection costs in logging road design and construction to prevent

increased sedimentation in the Carnation Creek watershed (Vancouver Island) ». Forêts Canada, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (C.-B.), Canada. Inf. Rep. BC-X-155.

Plamondon, A.P. 1982. Augmentation de la concentration des sédiments en suspension suite a l'exploitation forestière et durée de l'effet. Can. J. For. Res. 13: 883-892.

Plamondon, A.P. 1993. Influence des coupes forestières sur le régime d'écoulement de l'eau et sa qualité. Centre de recherche en biologie forestière, Université Laval et ministère des Forêts (Québec), Canada. 179 p.

Plamondon, A.P. 2002. L'exploitation forestière les débits de pointe : État des connaissances sur la prévision des augmentations des pointes, le concept de l'aire équivalente de coupe acceptable et les taux régressifs des effets de la coupe sur les débits de pointe. Direction de l'environnement forestier, ministère des Ressources naturelles (Québec), Canada.

Poff, L.N., J.D. Allen, M.B. Bain, J.R. Kerr, K.L. Prestegaard, B.D. Richter, R.E. Sparka et J.C. Stromberg. 1997. « The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration ». BioScience 47: 769-784.

Pomeroy, J.W., R.J. Granger, A. Pietroniro, J.E. Elliot, B. Toth et N. Hedstrom. 1997. « Hydrologic pathways in the Prince Albert Model Forest. Final report to the Prince Albert Model Forest Association », Institut national de recherches hydrologiques, Environnement Canada, Saskatoon (Sask.), Canada.

Ralph, S.C., G.C. Poole, L.L. Conquest et R.J. Naiman. 1994. « Stream channel morphology and woody debris in logged and unlogged basins of western Washington ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 51: 37-51.

Roberts, R.G. et M. Church. 1986. « The sediment budget in severely disturbed watersheds, Queen Charlotte Ranges, British Columbia ». Can. J. For. Res. 16: 1092-1106.

Roulet, N.T. et T.R. Moore. 1995. « The effect of forestry drainage practices on the emission of methane from northern peatlands ». Can. J. For. Res. 25: 491-499.

SCF (Service canadien des forêts). 2002. 2000-2001 L'état des forêts au Canada – La foresterie durable : une réalité au Canada. Ress. nat. Can., Serv. can. des for., Ottawa (Ont.) Canada.

Schindler, D.W., S.E. Bayley, B.R. Parker, K.G. Beaty, D.R. Cruikshank, E.J. Fee, E.U. Schindler et M.P Stainton. 1996. « The effects of climate warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario ». Limnol. Oceanogr. 41: 1004-1017.

Schindler, D.W., R.W. Newbury, K.G. Beaty, J. Prokopowich, T. Ruszczynski et J.A. Dalton. 1980. « Effects of windstorms and forest fire on chemical losses from forested watersheds and on the quality of receiving stream ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37: 328-334.

Steedman, R.J. et R.S. Kushneriuk. 2000. « Effects of experimental clearcut logging on thermal stratification, dissolved oxygen, and lake trout (Salvelinus namaycush) habitat volume in three small boreal forest lakes ». Can. J. Fish. Aquat. Sci. 57(Suppl. 2): 82-91.

Stocks, B.J., J.A. Mason, J.B. Todd, E.M. Bosch, B.M. Wotton, B.D. Amiro, M.D. Flannigan, K.G. Hirsch, K.A. Logan, D.L. Martell et W.R. Skinner. 2002. « Large forest fires in Canada, 1959-1997 ». J. Geophys. Res. 108: FFR5-1-FFR5-12.

Swanson, R.H. et G.R. Hillman. 1977. « Predicted increased water yield after clear-cutting verified in west-central Alberta ». Forêts Canada, Centre de recherches forestières du Nord, Edmonton (Alta.), Canada. Inf. Rep. NOR-X-198.

Verry, E.S. 1986. « Forest harvesting and water: the lake states experience ». Water Resour. Bull. 22: 1039-1047.

Vitt, D.H., L.A. Halsey, I.E. Bauer et C. Campbell. 2000. « Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene ». Can. J. Earth Sci. 37: 683-693.

Whalen, S.C. et W.S. Reeburgh. 1996. « Moisture and temperature sensitivity of CH_4 oxidation in boreal soils ». Soil Biol. Biochem. 28: 1271-1281.

Whitaker, A., Y. Alila, J. Beckers et D. Toews. 2002. « Evaluating peak flow sensitivity to clear-cutting in different elevation bands of a snowmelt-dominated mountainous catchment ». Water Resour. Res. 38: 1172.

Chapter 9

PRATIQUES ET CHANGEMENTS CONCERNANT L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE – PRODUCTION MINIÈRE ET PÉTROLIÈRE

Carol Ptacek[1], William Price[2], J. Leslie Smith[3], Mark Logsdon[4] et Rob McCandless[5]

[1] Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington (Ont.)

[2] Ressources naturelles Canada, Laboratoire des mines et des sciences minérales, Smithers (C.-B.)

[3] Université de la Colombie-Britannique, Chaire de géologie et d'environnement de la Cominco et du CRSNG, Vancouver (C.-B.)

[4] Geochimica Inc., Ojai (Californie)

Introduction

L'extraction de ressources non renouvelables, y compris les métaux, le pétrole brut, le gaz naturel, le charbon, les engrais et les agrégats utilisés en construction, est essentielle à notre niveau de vie actuel. Elle fournit un grand nombre des matières utilisées dans la fabrication des produits qu'on retrouve à la maison, au bureau, dans les automobiles ainsi que des produits de chauffage et du carburant. Bien que dans l'ensemble, l'impact de la production minière et pétrolière puisse être inférieur à celui d'autres utilisations du territoire, telles que l'agriculture et l'aménagement urbain, ces secteurs d'activité peuvent avoir un effet significatif localement sur la disponibilité de l'eau pour d'autres usages. De grands volumes d'eau sont employés dans les secteurs minier et pétrolier pour l'extraction et la concentration des métaux et des minerais non métalliques, pour l'extraction du pétrole brut léger et lourd et pour la production de l'électricité nécessaire au concassage du minerai et à sa transformation sur place, à la fusion et au raffinage des métaux ainsi qu'à d'autres traitements visant à améliorer les propriétés de ces matières premières (Environnement Canada, 2002; tableau 1).

Pour pouvoir accéder au minerai, on assèche les mines métalliques et non métalliques au moyen de puits de pompage, de techniques de dérivation de l'eau et de galeries à flanc de coteau (voir les figures 1 et 2). L'eau est employée pour traiter le minerai sur place après son extraction. Puisque cette eau est souvent recyclée, un grand nombre de mines peuvent limiter leurs rejets d'eau en cours d'exploitation. C'est ce que reflètent des enquêtes sur l'utilisation de l'eau effectuées par Environnement Canada. L'eau est principalement (78 %) rejetée dans des plans d'eau douce et, au-delà d'un traitement primaire, est peu traitée (Environnement Canada, 2002). Une fois l'extraction du minerai terminée, les mines à ciel ouvert et les chantiers d'abattage souterrains asséchés précédemment se remplissent de nouveau, ce qui contribue à accroître la dérivation des eaux souterraines et de surface. Il est difficile d'estimer avec précision les quantités d'eau prélevées et rejetées dans le cadre des activités minières en raison des incertitudes liées aux pertes par évaporation ainsi que des gains et pertes par écoulement souterrain pendant les phases actives et passives de l'exploitation minière.

Dans le contexte de la production de pétrole et de gaz naturel, l'eau est employée : comme fluide d'appoint pour maintenir la pression de l'eau interstitielle; pour récupérer des quantités additionnelles de pétrole brut (par injection d'eau dans une formation); pour extraire du pétrole brut de gisements de sables bitumineux; pour assécher des formations houillères afin de récupérer davantage de méthane. Une grande partie de l'eau d'appoint injectée pour la production de pétrole brut implique une dérivation des eaux de surface ou provient de nappes souterraines d'eau douce situées à de faibles profondeurs. Comme cette eau est injectée dans des formations profondes, elle n'est pas disponible pour d'autres utilisations ultérieures. Les grands volumes d'eau nécessaires au traitement des sables bitumineux sont retenus pendant plusieurs décennies dans les espaces interstitiels des amoncellements de résidus et sont également difficiles à récupérer. Quant au volume d'eau extrait pour la production de méthane de gisements houillers, il peut être très important et sa quantification s'impose.

D'énormes volumes de déchets sont produits par les industries de l'extraction minière et pétrolière. Les eaux de précipitation qui s'infiltrent dans ces déchets peuvent devenir très contaminées. La dégradation de la qualité de l'eau se poursuit pendant des décennies ou des siècles après l'extraction des ressources. Actuellement, il n'existe aucune méthodologie reconnue pour estimer la valeur de l'utilisation perdue de l'eau due à ces changements à long terme compromettant la qualité de l'eau.

Au Canada, ce sont les statistiques sur l'utilisation de l'eau par les industries de l'extraction minière et pétrolière qui présentent l'incertitude la plus grande

Tableau 1. Enquête sur l'utilisation de l'eau dans l'industrie de l'extraction des minéraux et dans les industries manufacturières connexes (en millions de m^3 d'eau/année), 1996 (Environnement Canada, 2002)

Activité	Quantité prélevée	Eau recyclée*	Utilisation brute	Quantité rejetée	Consommation**
Extraction de minéraux					
Mines métalliques	427,8	260	1 542	573,6	Sans objet
Mines non métalliques	56,3	72	97	72,4	Sans objet
Mines de charbon	34,2	124	77	25,9	Sans objet
Fabrication de produits minéraux					
Métaux de première fusion	1 423,0	1 447,9	2 870,9	1 303,0	1 20,0
Produits minéraux non métalliques	102,3	91,8	194,1	83,1	19,2
Produits du pétrole et du charbon	370,5	541,4	911,9	348,0	22,5

* Taux de recyclage = recyclage exprimé en % de la quantité prélevée.

** Il est impossible de fournir une estimation fiable de la consommation d'eau dans l'industrie de l'exploitation minière en raison de l'écart considérable qui existe entre la quantité d'eau prélevée et la quantité d'eau rejetée, écart probablement dû au fait qu'on n'a pas considéré les pertes par évaporation et par infiltration souterraine dans les bassins de résidus.

parmi toutes les grands secteurs industriels étudiés (Environnement Canada, 2002). Les enquêtes sont axées sur des installations canadiennes en activité. Cependant, dans l'industrie de l'extraction minière, la principale menace concernant la disponibilité de l'eau douce est le rejet d'eau de qualité inférieure longtemps après la fin des activités d'extraction. Les volumes d'eau trop altérée pour être réutilisée doivent être quantifiés. Dans l'industrie de l'extraction pétrolière, le volume d'eau dégradée par des problèmes environnementaux dont on a hérité peut également être suffisamment grand pour devoir être quantifié.

Menaces concernant la disponibilité de l'eau liées à l'extraction minière et pétrolière

Secteur des mines métalliques

Bien que la zone de perturbation immédiate soit relativement petite, l'extraction de minéraux métalliques et non métalliques peut nettement changer le paysage local en produisant de grands amas de roches cassées et broyées. On trouve au Canada de petites et de grandes mines, qui peuvent couvrir une superficie de plusieurs kilomètres carrés. Ces mines produisent des métaux tels que le cuivre, l'or, le fer, le nickel, l'argent et le zinc. Certaines mines ont été abandonnées il y a plus de cent et d'autres plus récemment. L'exploitation d'une mine de métaux comporte l'extraction d'une ressource et l'accumulation de déchets. Souvent, plus de 90 % de la roche extraite, et parfois au-delà de 99 %, est laissée sur place, et seul le reste (le produit) est acheminé à l'extérieur.

La roche métallifère est extraite de mines à ciel ouvert et de chantiers souterrains. La plupart des mines doivent être asséchées par pompage, par dérivation de l'eau ou par d'autres moyens (tableau 1). De grands cônes de dépression dans la nappe d'eau souterraine peuvent être créés à proximité de la mine (figure 1). On a recours à des dérivations et à des galeries pour évacuer l'eau ou l'empêcher d'atteindre les chantiers et pour limiter son écoulement à travers les déchets miniers (figure 2). L'abaissement du niveau de la nappe phréatique et la dérivation de l'eau de ruissellement vers d'autres bassins hydrographiques peuvent réduire considérablement le volume d'eau disponible pour d'autres usages (p. ex. la pêche) si la quantité d'eau utilisée est assez importante (p. ex., la dérivation de Kemano pour alimenter la fonderie de Kitimat, en Colombie-Britannique; voir également le chapitre 1) ou si la mine occupe la tête d'un petit bassin hydrographique (p. ex., la mine Mount Polley, en Colombie-Britannique). Dans des régions telles que les Territoires du Nord-Ouest et certains secteurs de l'Ontario et du Québec, l'assèchement de mines profondes peut se traduire par l'extraction d'eau saline et son évacuation à la surface.

Une fois l'extraction minière terminée, on met fin à l'assèchement, ce qui permet aux eaux de surface et souterraines de s'écouler dans les puits et les chantiers souterrains (figure 1). Le noyage de la mine peut prendre de quelques années (Levy et al., 1997) à de nombreuses décennies (Davis et Ashenberg, 1989), selon l'abaissement du niveau original des eaux souterraines, la quantité de précipitations et d'eau de surface disponibles et les propriétés physiques des matériaux géologiques environnants. Des données propres à l'emplacement sont nécessaires si l'on veut évaluer de façon précise les volumes d'eau consommée une fois l'exploitation terminée.

Les mines produisent deux principaux types de déchets : des roches stériles et des résidus. De taille grossière à

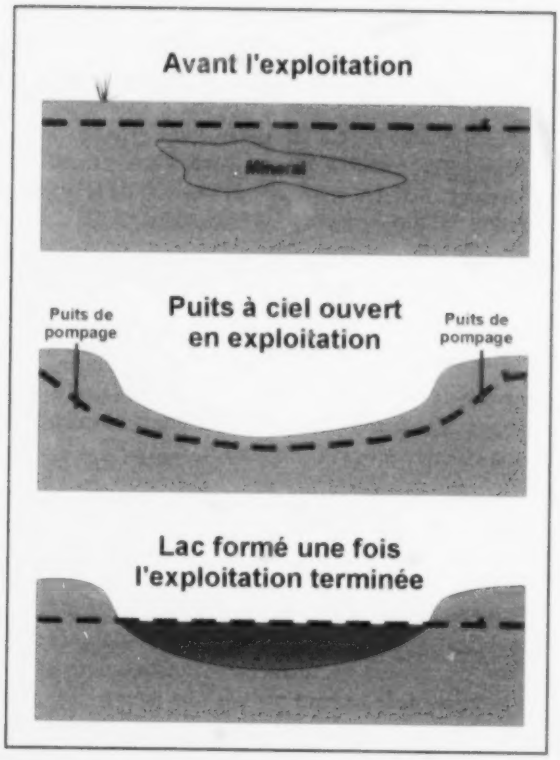


Figure 1. Schéma représentant l'incidence de l'exploitation minière sur une nappe phréatique avant, pendant et après l'exploitation. Le niveau de la nappe phréatique est abaissé pendant les étapes actives de l'exploitation et se rétablit progressivement lorsque la mine se remplit de nouveau. Le remplissage de la mine après sa fermeture peut prendre des années, voire des décennies. L'eau extraite au moment de l'assèchement est utilisée au cours d'activités d'exploitation ou de traitement ou est rejetée. L'eau servant au remplissage des mines n'est habituellement pas prise en compte dans les enquêtes sur la consommation d'eau.

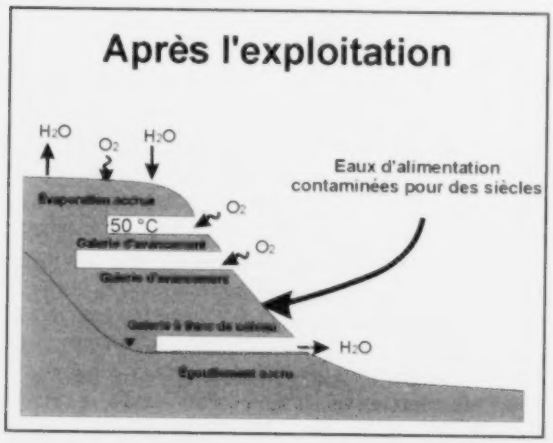


Figure 2. Schéma montrant les chantiers et les galeries à flanc de coteau utilisés pour abaisser le niveau de la nappe phréatique. L'égouttement accru à partir des chantiers et des galeries à flanc de coteau se traduit d'ordinaire par une dépression permanente dans la nappe phréatique.

fine, la roche stérile est extraite pour permettre l'accès au minerai. Compte tenu de sa faible teneur en métal recherché, son traitement ne serait pas rentable. La roche stérile est habituellement mise en tas, mais elle est aussi employée dans la construction de routes et de talus de confinement ou pour le remblayage de zones de travail inutilisées. Les résidus sont des déchets fins résultant du traitement d'un minerai. Les boues de résidu sont évacuées dans des ouvrages de retenue de l'eau ou sont retournés dans des zone de travail souterraines inutilisées. On estime la production quotidienne de roches stériles et de résidus au Canada respectivement à 1 000 000 et 950 000 tonnes (Gouvernement du Canada, 1991). Les accumulations de déchets des grandes mines comptent parmi les plus grandes structures artificielles du monde (CIGB [Commission internationale des grands barrages], 1996).

Dans une mine, les chantiers souterrains, les parois des mines à ciel ouvert, les talus, la roche stérile et les résidus entrent en contact avec l'oxygène de l'air. Les minéraux à base de sulfures contenus dans la roche hôte et les déchets miniers exposés à de l'oxygène peuvent libérer des acides et divers éléments (Al, As, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se et Zn) dans les eaux environnantes (voir la photographie). De l'eau de mauvaise qualité peut être présente dans les lacs formés dans les puits inondés (Miller et al., 1996; Levy et al., 1997; Morin et Hutt, 1997; Eary, 1999; Shevenell et al., 1999; Ramstedt et al., 2003), des chantiers souterrains (Morin et Hutt, 1997; Nordstrom et Alpers, 1999; Nordstrom et al., 2000), des systèmes d'écoulement souterrains adjacents à des mines (Blowes et Jambor, 1990; Blowes et al., 1991; Miller et al., 1996; Morin et Hutt, 1997; Johnson et al., 2000; Moncur et al., 2003) et des plans d'eau de surface (voir la photographie) (Morin et Hutt, 1997; Nordstrom et Alpers, 1999; Moncur et al., 2003). La plupart des mines métalliques et quelques mines de charbon révèlent des concentrations élevées de minéraux à base de sulfures et risquent de présenter des problèmes de qualité des eaux d'égouttement (Blowes et Jambor, 1990; Blowes et al., 1991; Morin et Hutt, 1997; Price et Errington, 1998, Price et Hart, 1999). Parmi les autres menaces pour la qualité de l'eau, mentionnons les réactifs utilisés dans le traitement du minerai, tels que le cyanure utilisé pour l'extraction de l'or, et les résidus d'explosifs. Une fois l'extraction du minerai terminée, l'eau provenant des chantiers souterrains et des amoncellements de déchets miniers peut être de qualité médiocre pendant des décennies, voire des siècles (Coggans et al., 1998; Nordstrom et Alpers, 1999; Wireman, 2002; Moncur et al., 2003).

Pendant la phase active de l'exploitation d'une mine métallique et les premières années suivant la fin des activités d'exploitation, les rejets dans les eaux de surface sont assujettis à la réglementation fédérale sur la qualité de l'eau. Au niveau provincial, des limites sont

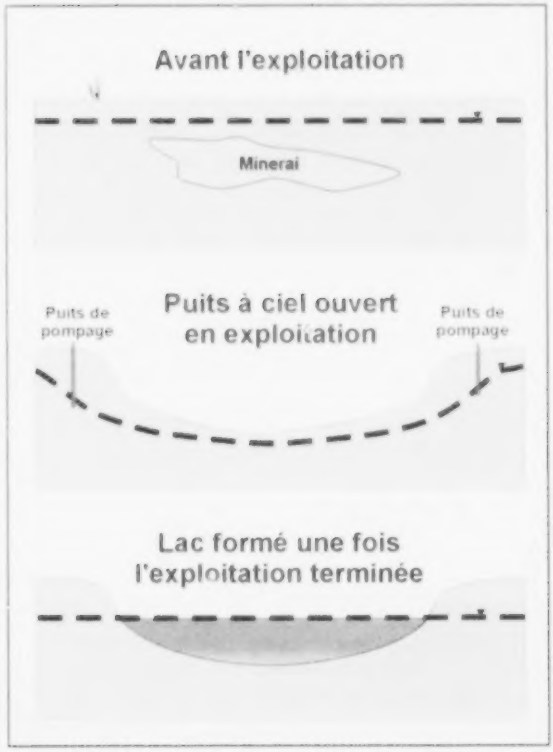


Figure 1. Schéma représentant l'incidence de l'exploitation minière sur une nappe phréatique avant, pendant et après l'exploitation. Le niveau de la nappe phréatique est abaissé pendant les étapes actives de l'exploitation et se rétablit progressivement lorsque la mine se remplit de nouveau. Le remplissage de la mine après sa fermeture peut prendre des années, voire des décennies. L'eau extraite au moment de l'assèchement est utilisée au cours d'activités d'exploitation ou de traitement ou est rejetée. L'eau servant au remplissage des mines n'est habituellement pas prise en compte dans les enquêtes sur la consommation d'eau.

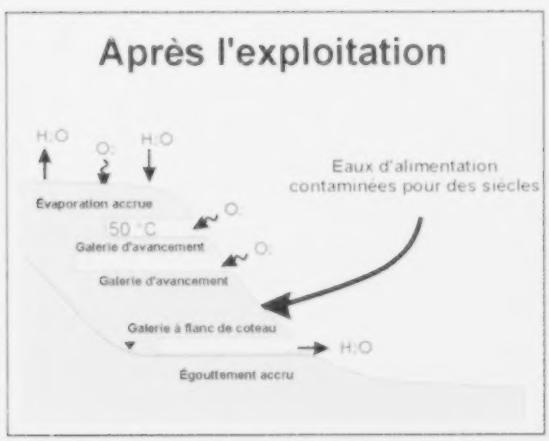


Figure 2. Schéma montrant les chantiers et les galeries à flanc de coteau utilisés pour abaisser le niveau de la nappe phréatique. L'égouttement accru à partir des chantiers et des galeries à flanc de coteau se traduit d'ordinaire par une dépression permanente dans la nappe phréatique.

fine, la roche stérile est extraite pour permettre l'accès au minerai. Compte tenu de sa faible teneur en métal recherché, son traitement ne serait pas rentable. La roche stérile est habituellement mise en tas, mais elle est aussi employée dans la construction de routes et de talus de confinement ou pour le remblayage de zones de travail inutilisées. Les résidus sont des déchets fins résultant du traitement d'un minerai. Les boues de résidu sont évacuées dans des ouvrages de retenue de l'eau ou sont retournés dans des zone de travail souterraines inutilisées. On estime la production quotidienne de roches stériles et de résidus au Canada respectivement à 1 000 000 et 950 000 tonnes (Gouvernement du Canada, 1991). Les accumulations de déchets des grandes mines comptent parmi les plus grandes structures artificielles du monde (CIGB [Commission internationale des grands barrages], 1996).

Dans une mine, les chantiers souterrains, les parois des mines à ciel ouvert, les talus, la roche stérile et les résidus entrent en contact avec l'oxygène de l'air. Les minéraux à base de sulfures contenus dans la roche hôte et les déchets miniers exposés à de l'oxygène peuvent libérer des acides et divers éléments (Al, As, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se et Zn) dans les eaux environnantes (voir la photographie). De l'eau de mauvaise qualité peut être présente dans les lacs formés dans les puits inondés (Miller et al., 1996; Levy et al., 1997; Morin et Hutt, 1997; Eary, 1999; Shevenell et al., 1999; Ramstedt et al., 2003), des chantiers souterrains (Morin et Hutt, 1997; Nordstrom et Alpers, 1999; Nordstrom et al., 2000), des systèmes d'écoulement souterrains adjacents à des mines (Blowes et Jambor, 1990; Blowes et al., 1991; Miller et al., 1996; Morin et Hutt, 1997; Johnson et al., 2000; Moncur et al., 2003) et des plans d'eau de surface (voir la photographie) (Morin et Hutt, 1997; Nordstrom et Alpers, 1999; Moncur et al., 2003). La plupart des mines métalliques et quelques mines de charbon révèlent des concentrations élevées de minéraux à base de sulfures et risquent de présenter des problèmes de qualité des eaux d'égouttement (Blowes et Jambor, 1990; Blowes et al., 1991; Morin et Hutt, 1997; Price et Errington, 1998, Price et Hart, 1999). Parmi les autres menaces pour la qualité de l'eau, mentionnons les réactifs utilisés dans le traitement du minerai, tels que le cyanure utilisé pour l'extraction de l'or, et les résidus d'explosifs. Une fois l'extraction du minerai terminée, l'eau provenant des chantiers souterrains et des amoncellements de déchets miniers peut être de qualité médiocre pendant des décennies, voire des siècles (Coggans et al., 1998; Nordstrom et Alpers, 1999; Wireman, 2002; Moncur et al., 2003).

Pendant la phase active de l'exploitation d'une mine métallique et les premières années suivant la fin des activités d'exploitation, les rejets dans les eaux de surface sont assujettis à la réglementation fédérale sur la qualité de l'eau. Au niveau provincial, des limites sont

imposées sur les effluents tant qu'il existe un risque important de contamination; ces limites s'appliquent souvent indéfiniment lorsqu'il y a risque de lixiviation des métaux ou d'écoulement d'acides important. En Colombie-Britannique, des limites concernant les rejets dans les eaux de surface, combinées à des exigences d'atténuation des impacts négatifs sur l'environnement, d'entretien, de valorisation et de surveillance, peuvent être établies pour chaque étape de la durée de vie d'une mine (Price, 1999). Le rejet de substances nocives dans des eaux de surface abritant des habitats du poisson est régi par la *Loi sur les pêches* du Canada.

Au Canada, un grand nombre de vieilles mines, telles que les mines Kam Kotia (Ontario), Britannia (Colombie-Britannique) et Sherridon (Manitoba), continuent de libérer des substances nocives qui contaminent les eaux de surface et les eaux souterraines. Les mines modernes appliquent des programmes coûteux pour contrer les effets négatifs de leurs activités. Le coût des investissements pour le traitement de l'eau excède souvent des dizaines de millions de dollars, les frais d'exploitation ultérieurs à la fermeture sont de l'ordre du million de dollars par année, et le coût total peut dépasser 100 millions de dollars (Price et Bellefontaine, 2002).

Il n'existe aucune information précise sur le volume d'effluents contaminés rejetés dans les plans d'eau de surface et les aquifères par les mines du Canada ou d'autres parties du monde. Cependant, ce sont les vieilles mines abandonnées qui semblent compromettre le plus les ressources en eau. Les États-Unis comptent entre 20 000 et 50 000 mines en grande partie abandonnées qui rejettent des eaux à haute teneur en métaux et en acides sur les terres relevant de la responsabilité du Forest Service des États-Unis (USDA, 1993). Plus de 4 000 milles de cours d'eau dans l'est des États-Unis et entre 5 000 et 10 000 milles de cours d'eau dans l'ouest du pays ont été l'objet d'effets négatifs par les effluents des mines (Kleinmann, 1990; USDA, 1993). Le Canada compte environ 10 000 mines inactives. On ne possède cependant aucune donnée précise sur le nombre total de mines, la taille des mines et leurs effets sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau.

Eau d'égouttement de piètre qualité émanant de la mine de Sherridon située dans le nord du Manitoba. À cet endroit, les déchets et les chantiers se sont oxydés pendant plus de 70 ans, ce qui a provoqué le rejet de concentrations élevées de produits d'oxydation des sulfures dans les eaux de surface. La qualité de l'eau est fortement dégradée dans quatre lacs entourant la mine. En l'absence d'un programme de biorestauration efficace, de l'eau de piètre qualité continuera de s'égoutter pendant des siècles. Le volume d'eau altérée correspond à bien des fois le volume d'eau initial employé pendant l'exploitation minière, ce qui indique qu'on doit inclure les taux d'utilisation pendant les étapes d'exploitation active et d'inactivité dans les vérifications des taux de consommation de l'industrie minière.

La plupart des mines sont situées dans des régions peu peuplées où la principale utilisation concurrente de l'eau est l'habitat d'espèces sauvages, dont les poissons. Dans les régions plus humides, la disponibilité de réserves d'eau douce fiables ne pose pas problème. Cependant, les mesures d'élimination des effets de l'exploitation minière sur la pêche et d'autres utilisations de l'eau peuvent se traduire par une hausse marquée des coûts de cette activité (p. ex., la mine Kemess, en Colombie-Britannique) et pourraient empêcher ce type d'exploitation. Même si la plupart des mines se trouvent dans des régions où la densité de la population est faible, leurs activités peuvent avoir un impact sur des droits des Premières nations issus de traités (p. ex., Rae Rock, dans les Territoires du Nord-Ouest) ou sur d'autres engagements prioritaires des gouvernements, tels que les parcs provinciaux (p. ex., assèchement dans le cadre du projet de la mine Aquarius, près du lac Nighthawk, en Ontario). Dans certaines régions, des localités avoisinant une mine doivent maintenant s'attaquer à des problèmes d'ordre physique et chimique découlant de l'activité minière antérieure et assurer la sécurité publique.

On a proposé une variété de mesures d'atténuation pour limiter les impacts de l'oxydation des sulfures sur l'environnement (Blowes et al., 1994; Feasby et al., 1991; Feasby et Tremblay, 1995; Price et Errington, 1998). Les techniques le plus souvent utilisées au Canada sont le traitement chimique des eaux d'égouttement, le noyage des déchets miniers pour produire une couverture aqueuse et la mise en place d'une couverture sèche. Le traitement chimique est très efficace pour retirer les métaux des eau d'égouttement de surface mais, en raison de son impact sur le site, de l'élimination des boues et des coûts inhérents élevés, il tend à être considéré comme une stratégie de dernier recours. Le noyage des déchets dans un ouvrage de retenue de l'eau aménagé, dans d'anciens chantiers d'abattage ou dans des plans d'eau naturels peut être très efficace pour limiter l'oxydation des déchets réactifs récents (Vigneault et al., 2001; Price, 2001). Le noyage exige cependant que de l'eau

soit disponible en permanence. On a proposé d'autres techniques de couverture pour réduire l'apport d'eau et d'oxygène dans les déchets miniers. Par exemple, en Colombie-Britannique, au moins treize mines importantes font ou feront appel au traitement chimique des eaux d'égouttement, vingt-quatre emplacements emploient ou emploieront des couvertures aqueuses pour contrer les effets environnementaux et neuf emplacements utilisent ou envisagent d'utiliser des couvertures sèches (Price et Bellefontaine, 2002).

Voici d'autres pratiques qui se sont avérées efficaces pour atténuer la lixiviation des métaux associée à l'oxydation des sulfures.

- Éviter les matériaux problématiques.
- Séparer les déchets.
- Dériver les eaux en amont.
- Ajouter de la chaux pendant le traitement.
- Changer la méthode de traitement du minerai.
- Évacuer les eaux d'égouttement à un moment précis.
- Mélanger les déchets pour obtenir un matériau composite inerte.
- Situer les installations de manière à permettre la collecte des eaux d'égouttement.
- Limiter la lixiviation et maximiser la dilution et l'atténuation naturelles.
- Traiter les eaux d'égouttement sans faire appel à un procédé chimique.

Souvent, on emploie une combinaison de stratégies d'atténuation, soit pour assurer une protection de base, soit pour parer aux imprévus. Plusieurs stratégies impliquent l'utilisation d'eau, des dérivations et des rejets pendant de longues périodes après que l'extraction de minerai a pris fin.

Les raffineries et les fonderies qui transforment des concentrés de minerai utilisent de grands volumes d'eau pour la transformation proprement dite et le refroidissement (tableau 1). Les eaux qu'elles rejettent et les eaux d'égouttement qui s'infiltrent dans les déchets qu'elles produisent sont donc susceptibles d'être contaminées. Puisque ces usines transforment des concentrés, la teneur en métaux de leur flux de déchets est souvent beaucoup plus élevée. Il y a donc une plus grande possibilité que leurs activités aient des effets néfastes sur la qualité de l'eau par unité de masse ou de volume.

Secteur des mines non métalliques

L'exploitation de mines non métalliques – y compris la production d'engrais potassiques et phosphatés, d'uranium, de sable de concassage et de gravier broyé, de charbon, de sel, de pierres de taille, de gypse et, plus récemment, de diamants –, nécessite l'utilisation d'eau. Si ces installations sont situées dans l'Ouest semi-aride, la disponibilité de l'eau peut limiter leurs activités. C'est le cas de plusieurs mines de potasse des Prairies.

La production de potasse inclut d'ordinaire un procédé de séparation qui exige le pompage d'eau souterraine ou la dérivation d'eau de surface. L'eau se perd par évaporation et, parfois, parce qu'elle est injectée dans des puits profonds ou qu'elle alimente les nappes souterraines. La demande en eau nécessaire à la production de potasse doit être proportionnée aux utilisations concurrentes dans la région.

La transformation du charbon exige de l'eau et, bien que ce soit moins fréquent que dans le cas des mines métalliques, les déchets et les chantiers des mines de charbon peuvent être une source potentielle de lixiviation de métaux ainsi que de métalloïdes et d'eaux d'égouttement acides. L'utilisation de l'eau, la production d'énergie hydroélectrique et l'utilisation industrielle du charbon sont traitées aux chapitres 2 et 5 du présent document.

L'utilisation de l'eau est moins importante dans le contexte de l'exploitation d'agrégats utilisés en construction, comparativement aux autres formes d'exploitation minière. Cependant, ce genre d'activité peut abaisser le niveau de la nappe phréatique localement et nécessite souvent l'application de mesures de lutte contre l'érosion et de rétention des sédiments afin d'assurer des eaux d'égouttement de qualité acceptable.

L'extraction à ciel ouvert et souterraine de kimberlite (diamants) a été amorcée récemment au lac de Gras, dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. L'assèchement de ces mines peut mener à l'extraction d'eaux salines profondes. En outre, des eaux d'égouttement dégradées peuvent s'écouler des amoncellements de roches stériles si aucune mesure de gestion appropriée n'est prise activement (Baker et al., 2003). La pénurie d'eau dans cette région provoque une hausse des coûts du traitement de l'eau nécessaire au maintien d'une qualité acceptable des effluents.

Secteur de l'extraction du pétrole et du gaz

De grands volumes d'eau sont employés pour l'extraction du pétrole et du gaz (tableau 1), et une bonne partie de l'eau ainsi consommée n'est plus disponible. Voici les principales utilisations de l'eau dans ce secteur.

- Fluide d'appoint maintenant la pression dans les formations pour la production de brut léger
- Récupération tertiaire
- Extraction de brut lourd de sables bitumineux
- Extraction de méthane de gisements houillers.

Dans le cas de l'extraction du brut léger, le pétrole et l'eau sont pompés à la surface, ce qui produit une baisse de la pression dans la formation. Pour contrer cet effet, on injecte un fluide (eau douce, saumâtre ou recyclée ou

dioxyde de carbone) dans la formation. Au tout début de l'exploitation d'un puits, il est possible que le pourcentage de pétrole récupéré soit élevé. Le cas échéant, de grands volumes de fluide doivent être injectés dans la formation pour remplacer le pétrole et l'eau extraits. Au fur et à mesure que ce pourcentage diminue, le besoin de fluide d'appoint peut également diminuer. Certaines méthodes, dites de récupération tertiaire, qui sont employées pour recueillir davantage de pétrole nécessitent aussi l'utilisation d'eau. Ces méthodes peuvent impliquer l'application d'une surpression et l'injection de solutions de surfactants, de vapeur et d'autres fluides dans la formation. Lorsque de l'eau douce est utilisée dans ces divers procédés, elle devient habituellement très contaminée et ne peut être réutilisée.

On utilise de la vapeur produite à partir d'eaux de surface et d'eaux souterraines pour extraire le pétrole des gisements de sables bitumineux. Il faut environ trois barils d'eau pour extraire un baril de pétrole. La réutilisation de l'eau employée pour l'exploitation des sables bitumineux est limitée du fait que cette eau met beaucoup de temps à s'écouler des installations de confinement et que le coût de son épuration est élevé. En raison de l'apparition relativement récente d'installations de confinement des déchets dans l'industrie des sables bitumineux, on dispose de peu de données sur le volume et la qualité des effluents contaminés qui seront rejetés.

L'extraction du méthane des gisements houillers exige l'assèchement de grands volumes de roche pour accroître la production. L'eau usée produite dans le cadre de cette opération peut être de piètre qualité, allant d'inférieure aux normes à saumâtre. En outre, ces activités d'assèchement risquent de provoquer la baisse du niveau des plans d'eau avoisinants.

Dans des régions humides du Canada, les activités d'extraction du pétrole ne sont généralement pas limitées par la disponibilité de l'eau. Les effets de la consommation d'eau sont habituellement locaux, et la variation de la qualité de l'eau est une des principales préoccupations. En revanche, les régions semi-arides et arides des Prairies sont confrontées à des pénuries d'eau de plus en plus importantes en raison de l'intensification de la production pétrolière, de l'agriculture et de l'urbanisation. Par exemple, l'industrie du pétrole et du gaz de l'Alberta est autorisée à utiliser 25 % des réserves d'eau souterraine de la province pour l'exploitation des puits de pétrole.

L'extraction du pétrole et du gaz peut également causer une dégradation des eaux dans les aquifères peu profonds en raison de fuites dans le tubage des puits et dans les pipelines et du rejet à faible profondeur des eaux de formations salines. Compte tenu du grand nombre de puits et de pipelines en place dans certaines régions, la portée de ces effets peut passer de locale à régionale.

Tendances

En général, on admet maintenant que la surface de la Terre s'est réchauffée et que le réchauffement se poursuivra encore pendant plusieurs décennies. Le changement climatique planétaire peut avoir des répercussions importantes, dont certaines ne sont pas évidentes, sur le bilan hydrique des régions situées à des latitudes allant de moyennes à élevées. Par exemple, la réévaluation détaillée des données mondiales des 50 dernières années a révélé une diminution significative sur le plan statistique des taux d'évaporation (mesurés à l'aide de bacs), et que cette diminution correspond à une hausse des températures moyennes de la surface de la Terre (Roderick et Farquhar, 2002). Les prévisions concernant l'incidence du changement climatique sur les problèmes de disponibilité et de qualité de l'eau associés à l'extraction minière et pétrolière sont un aspect déterminant de la gestion à long terme de l'eau. Cependant, il est important de souligner qu'il faut évaluer les tendances relatives à l'utilisation de l'eau pour ces secteurs dans des conditions climatiques à la fois courantes et en changement.

Secteurs des mines métalliques et des mines non métalliques

La quantité d'eau utilisée pour l'aménagement et l'exploitation des mines métalliques a augmenté légèrement au cours des dernières décennies (Environnement Canada, 2002). Pour les mines inactives, on ne dispose pas en général de statistiques sur le prélèvement d'eau. On sait que de l'eau est utilisée pour renoyer des mines et maintenir des systèmes de protection de l'environnement, notamment les couvertures aqueuses. On ne dispose pas non plus de statistiques sur les rejets d'eau. De l'eau contaminée peut être rejetée par les canaux d'égouttement, les chantiers souterrains, les bassins de résidus, les amoncellements de roches stériles et les bassins de déchets de raffinage. Les rejets, atténués ou non, peuvent se produire directement dans les eaux de surface ou dans le soussol.

Au Canada, le nombre de mines et l'envergure des mines ont augmenté considérablement depuis les années 1940. Des concentrations maximales de contaminants dans les rejets provenant des mines peuvent apparaître bien des années après le début de l'exploitation de ces sites. L'apparition tardive de cette contamination est attribuable au report du noyage des mines et des mesures temporaires de neutratisation des rejets acides et d'atténuation des contaminants ainsi qu'aux longs délais de transport dans les eaux souterraines. Puisque le volume total de déchets miniers et le nombre total de mines augmentent, on peut prévoir un accroissement du potentiel de contamination. On prévoit également une hausse du volume d'eau nécessaire aux activités de protection de l'environnement (programmes de remise en végétation, couvertures aqueuses, dilution des eaux d'égouttement).

La prévention de la dégradation de la qualité de l'eau nécessite souvent des installations d'atténuation capables de fonctionner dans des conditions climatiques normales et à la suite d'événements climatiques extrêmes. Par exemple, on doit être en mesure de prévoir avec précision la fréquence et la durée des sécheresses afin d'assurer la disponibilité de quantités d'eau appropriées pour le noyage ou la dilution, pour la remise en végétation et la formation de couvertures de sol bloquant le passage d'oxygène et pour la prévention du transport des résidus par le vent. Une prévision de la crue des eaux est nécessaire à la conception de barrages, de systèmes de collecte et de traitement, de structures de dérivation et de couvertures aqueuses. Pour la plupart des districts miniers, le manque de données à long terme sur la température, l'enneigement, les précipitations et d'autres variables hydrologiques nécessaires pour les calculs prévisionnels fait obstacle à l'établissement de crues nominales.

La dilution est souvent utilisée pour gérer les eaux d'égouttement des mines canadiennes. Les mesures prises pour acheminer ces eaux dans des voies de dérivation permanentes peuvent suffire à protéger d'autres ressources aquatiques, mais elles doivent être examinées avec soin. Cependant, les lignes directrices et les règlements sur la qualité des eaux de surface étant de plus en plus rigoureux, il arrive souvent que la dilution ne suffise pas. Par exemple, lorsque d'autres entités veulent utiliser le débit d'eau et que celui-ci diminue en raison de variations climatiques, il se peut que la quantité d'eau disponible ne permette pas de respecter les lignes directrices.

À plusieurs installations minières, on se préoccupe surtout d'empêcher l'oxydation des déchets à forte teneur en sulfures en aménageant une couverture aqueuse; les déchets sont recouverts d'eau pour limiter l'oxydation et la libération de métaux. Ainsi, en Colombie-Britannique, on compte actuellement dix installations d'élimination de résidus qui utilisent une couverture aqueuse pour empêcher l'oxydation des sulfures. L'efficacité à long terme de ces installations de gestion des déchets exige un bilan hydrique favorable et une gestion technique active (Yanful et Verma, 1999; Martin et al., 2001). L'approvisionnement en eau de tels systèmes peut être assuré naturellement dans certaines régions de la Colombie-Britannique et de l'est du Canada. Dans d'autres parties du pays, il peut être beaucoup plus difficile d'obtenir l'eau nécessaire à cette fin.

La conception d'installations de gestion des déchets pouvant résister aux inondations est difficile dans la plupart des districts miniers en raison du manque de données hydrologiques recueillies sur une longue période à partir desquelles il est possible d'effectuer des calculs prévisionnels. Toutefois, ce manque de données n'est pas le seul problème. Au site de résidus miniers de Mattachewan, en Ontario, une brèche dans un barrage de castors a fait augmenter le débit à une ampleur prévue pour une crue à récurrence de 200 ans, alors que l'installation était conçue en fonction d'une crue centennale. En conséquence, une digue s'est fissurée à la suite de l'inondation de sa fondation, et des résidus ont été déversés dans la rivière Montreal, provoquant une contamination à grande échelle en aval. Des crues naturelles de même ampleur pourraient avoir des conséquences semblables. Selon Davies (2002), une défaillance importante d'une digue de contention des résidus est survenue chaque année quelque part dans le monde au cours des dernières décennies. Ces défaillances sont attribuées principalement à l'endommagement de la base des digues et à une surverse, entraînant l'instabilité des digues et, dans certains cas, la liquéfaction des résidus (par exemple, Hudson-Edwards et al., 2003; voir également le résumé des données de la Commission internationale des grands barrages et de la U.S. Commission of Large Dams qui figure dans Strachan, 2002). Parmi les exemples de défaillances semblables survenues depuis 1994, mentionnons celle des digues de contention des résidus de Merriespriut, en Afrique du Sud (1994), d'Omai, en Guyane (1995), de Pinto Valley, aux États-Unis (1997), de Los Frailes, en Espagne (1998), et d'Aurul, en Roumanie (2000). En plus de ces défaillances majeures, de nombreux exemples de défaillances physiques moins catastrophiques ont été documentés. Une pluviosité accrue peut également causer des incidents de contamination chimique en raison d'un accroissement du volume des eaux contaminées qui peuvent alors franchir la digue et s'écouler en aval (Macklin et al., 2003).

La prévision précise du ruissellement dans la zone de confinement est essentielle à la conception de systèmes de collecte et de traitement des eaux d'égouttement contaminées. En cas de débit excessif, les eaux ne seront pas entièrement recueillies, et il est possible que les systèmes de traitement ne puissent donner le rendement nécessaire pour empêcher la contamination en aval. De telles situations peuvent avoir des effets négatifs sur les écosystèmes d'aval et sur le maintien de réserves d'eau douce pour d'autres utilisateurs. Par exemple, le système de collecte de la mine Equity, en Colombie-Britannique, a été conçu pour contenir une crue centennale. Or, des prévisions imprécises ont donné lieu à des rejets non planifiés à l'occasion de crues de moindre importance survenues au cours de deux des cinq dernières années. Dans ce cas-ci, c'est le système de collecte qui avait été conçu à partir de prévisions de ruissellement imprécises. La défaillance de la digue de confinement des résidus d'Aurul (Baie Mare), en Roumanie, survenue en 2000 est un exemple de catastrophe écologique : des pluies tombant sur de la neige tardive ont provoqué une crue supérieure au seuil calculé. L'accès à des données hydrologiques et à des méthodes de prévision des con-

ditions hydrologiques plus précises permettrait d'améliorer la conception des installations de confinement.

Les cycles de périodes humides et sèches constituent une variation climatique normale. Pendant les périodes sèches, des sels efflorescents solubles peuvent s'accumuler dans les déchets miniers. Les premières précipitations suivant des périodes de faibles précipitations ou d'absence de précipitations peuvent provoquer une hausse des concentrations de métaux et d'acides dans les eaux réceptrices (Alpers et al., 1994; Jambor et al., 2000). Si les cycles de périodes sèches et humides augmentent au Canada, par exemple en raison de changements climatiques, ces concentrations sont susceptibles de fluctuer davantage, comme on le constate actuellement dans des régions arides et semi-arides des États-Unis. En plus de son impact sur les déchets miniers renfermant des sulfures, cette situation pourrait se répercuter sur les gisements importants d'uranium à très haute teneur situés dans le nord de la Saskatchewan et dans les Territoires du Nord-Ouest, où les uranifères sont sujets à l'oxydation.

Le début de l'exploitation de mines de diamant au Canada soulève de nouvelles préoccupations concernant l'utilisation de l'eau. Même si les eaux de surface sont apparemment abondantes dans le Nord, une grande partie des terres sont en fait semi-arides selon la plupart des classifications climatiques. Ainsi, il est probable que la quantité d'eau disponible pour la dilution des eaux d'égouttement des mines soit limitée.

Ces nouvelles mines ont provoqué un accroissement de l'intérêt à l'égard de l'utilisation du pergélisol pour créer des barrages et pour limiter l'oxydation de sulfures. Nous avons besoin de plus de données concernant les répercussions à long terme de l'exploitation du pergélisol sur la consommation d'eau et la gestion de la qualité de l'eau.

Le volume d'agrégats extrait des puits et des carrières est considérable. Au Canada, c'est par milliers que l'on compte le nombre d'opérations d'extraction d'agrégats. Les extractions mineures sont nombreuses et coïncident souvent avec des activités de construction. À proximité des centres urbains, l'extraction d'agrégats est habituellement plus importante et peut durer pendant plusieurs décennies, voire plus longtemps. Lorsque le niveau des nappes phréatiques est élevé, il faut procéder à un assèchement en profondeur pour accéder à la roche et au gravier. Or, cet assèchement peut affecter les ressources en eau locales et le niveau des plans d'eau de surface avoisinants. De leur côté, les activités de lavage à la battée risquent d'occasionner une augmentation des concentrations de solides en suspension. En général, les effets de ces activités ne persistent pas longtemps après la fin des opérations d'extraction. Dans les zones urbaines, lorsque les sources d'agrégats peu profondes diminuent, il devient rentable de creuser plus profondément, et les activités d'assèchement s'intensifient. Au Canada, il existe un grand nombre de zones urbaines, notamment Calgary et Toronto, où les besoins en eau liés à la production d'agrégats et ceux des municipalités, des industries et des installations récréatives sont difficiles à réconcilier. Aussi, avec l'accroissement de l'urbanisation, on prévoit que des conflits de ce genre surviendront plus souvent.

Secteur de l'extraction du pétrole et du gaz

Le volume d'eau nécessaire à la production pétrolière augmente avec l'accroissement des besoins en eau d'injection et l'amorce de l'exploitation de gisements de sables bitumineux importants. Dans l'Ouest canadien, de grands volumes d'eau de surface et souterraine sont employés pour l'injection d'eau. Chaque année, on fore des milliers de nouveaux puits d'eau souterraine et on continue de dériver des eaux de surface pour l'extraction du pétrole. Le pompage d'eaux souterraines peu profondes n'est pas coûteux. D'ordinaire douces, ces eaux sont une ressource recherchée par d'autres utilisateurs, notamment les secteurs résidentiel et agricole. Compte tenu des pressions exercées concernant l'utilisation de ces eaux, des efforts ont été consentis dans les régions arides et semi-arides de l'Ouest pour que les eaux disponibles soient employées de façon plus efficace.

Alors que le volume global d'eau consommée pour la production pétrolière a augmenté, le volume d'eau dérivée de sources d'eau douce de surface et souterraine a diminué. En Alberta, 88,7 millions de mètres cubes d'eau dérivée ont été employés en 1973, comparativement à 47,5 millions de mètres cubes en 2002, soit une réduction de 46 % (Alberta Environment, 2003). On utilise de plus en plus de l'eau recyclée, saumâtre et saline, entre autres, comme eau d'appoint. Bien que le volume d'eau dérivée diminue, le volume actuellement employé demeure substantiel. En Alberta, ce sont 26,9 millions de mètres cubes d'eau de surface et 10,1 million de mètres cubes d'eau souterraine non saline qui ont été injectés dans les formations en 2002. Avec le temps, à mesure que les gisements de pétrole gagnent en âge, le volume d'eau produit augmente et les besoins en eau d'appoint diminuent. Dans les régions où de nouveaux projets d'exploitation seront mis en oeuvre, de grands volumes d'eau seront encore requis. De plus, de l'eau sera également nécessaire pour l'extraction tertiaire si des conditions économiques favorables rendent la récupération de ces ressources rentable. L'utilisation de l'eau aux fins d'injection est surveillée attentivement; on a produit récemment un rapport détaillé sur cette utilisation de l'eau en Alberta (Alberta Environment, 2003).

De grandes quantités d'eau de surface et d'eau souterraine sont également employées pour la production de brut lourd à partir de gisements de sables bitumineux. On souhaite accroître cette production, mais en raison des demandes en eau des secteurs agricoles et de l'accroissement de l'urbanisation dans les régions où se

trouvent des sables bitumineux, un tel accroissement est aujourd'hui plus controversé. Il y a actuellement en Alberta plus d'une douzaine de projets concernant les sables bitumineux qui sont en cours ou planifiés. En Alberta et en Saskatchewan, d'importantes initiatives ont été lancées pour équilibrer les besoins en eau des producteurs de produits pétroliers et d'autres utilisateurs.

L'extraction de méthane dans les gisements houillers suscite de plus en plus d'intérêt. On procède à l'assèchement de gisements de charbon pour accroître la récupération de méthane. Il est probable que cette activité prenne de l'ampleur, et les besoins en eau qui y sont associés doivent être quantifiés. L'importance des opérations d'extraction de méthane dans les gisements houillers peut être relativement faible ou importante. Les nouvelles méthodes de récupération du pétrole nous obligeront à évaluer les besoins en eau et à tenir compte des autres utilisations dans les régions visées.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

La principale menace que l'industrie de l'extraction minière fait peser sur la disponibilité de l'eau douce au Canada n'est pas le prélèvement direct d'eau pendant l'extraction de minerai, mais plutôt le rejet d'eau de qualité inférieure longtemps après l'arrêt des activités d'extraction. La principale menace que représente l'industrie de l'extraction du pétrole concernant la disponibilité de l'eau douce au Canada est la dérivation d'eau de surface et d'eau souterraine à des fins d'injection et l'utilisation d'eau pour l'exploitation des sables bitumineux. Il faut également prendre en considération la dégradation de la qualité de l'eau causée par les activités pétrolières courantes et antérieures. Voici des recommandations sur les besoins en matière de connaissances et de programmes.

- Améliorer les bases de données sur la chimie des eaux d'égouttement et les charges de contaminants ainsi que sur le nombre, la taille et l'emplacement de tous les chantiers miniers et les sites de déchets miniers, actifs et inactifs, au Canada.
- Accroître la capacité de prévoir les propriétés chimiques des eaux d'égouttement des déchets miniers et des chantiers miniers en exploitation et fermés.
- Approfondir la question des besoins potentiels en matière d'atténuation, y compris l'entretien et les réparations nécessaires aux sites d'exploitation minière inactifs.
- Évaluer l'ampleur de la contamination des eaux de surface et des eaux souterraines par les mines dans différentes régions et conditions hydrologiques au Canada.
- Améliorer les prévisions à long terme des phénomènes climatiques extrêmes : crues maximales probables, variabilité climatique et incidence du changement climatique à long terme sur les phénomènes climatiques extrêmes.
- Étendre le réseau de surveillance climatique de référence; entre autres, assurer une surveillance hydrographique de base des cours d'eau afin de profiter d'une compréhension intégrée des effets du climat, de la pluviosité et des changements anthropiques à l'échelle du bassin hydrographique ainsi que des précipitations, de la température et de l'enneigement (par exemple, épaisseur du manteau nival et teneur en eau) aux sites d'exploitation minière.
- Améliorer les évaluations des ressources en eau dans les régions semi-arides et arides (disponibilité des eaux de surface et des eaux souterraines, exploitation de prélèvements d'eaux souterraines), en particulier les régions productrices de pétrole (par ex., en Alberta et en Saskatchewan), mais aussi les régions où on produit des engrais, des diamants et des métaux. On a également besoin de prévisions démographiques régionales.
- Utiliser des prévisions améliorées de la variabilité climatique et de la qualité de l'eau pour améliorer la gestion des déchets et en atténuer les effets, y compris la question du pergélisol.
- Développer des capacités dans tous les secteurs de l'industrie de l'exploitation minière et améliorer la collaboration entre les chercheurs et les praticiens – par ex., partenariats entre des universités, l'industrie, les collectivités et les gouvernements, pour évaluer avec précision les bilans hydrique et massique à long terme de mines – y compris la relation à long terme pour des mines spécifiques situées dans des régions types.
- Se pencher sur les questions technico-sociologiques relatives à l'eau qui concernent les Premières nations, les zones écologiques spéciales et les parcs protégés.
- Évaluer et améliorer la gestion de l'eau dans les régions où des mines d'uranium sont exploitées.

Références

Alberta Environment. 2003. « Water use for injection purposes in Alberta ». ISBN No. 0-7785-3000-0.

Alpers, C.N., D.K. Nordstrom et J.M. Thompson. 1994. « Seasonal variations of Zn/Cu ratios in acid mine water from Iron Mountain, California », p. 324-344. *Dans* Alpers, C.N. et D.W. Blowes (s. la dir. de), « Environmental geochemistry of sulphide oxidation ». American Chemical Society Symposium Series 550.

Baker, M.J., D.W. Blowes, M.J. Logsdon et J.L. Jambor. 2003. « Environmental geochemistry of kimberlite materials: Diavik Diamonds Project, Lac De Gras, Northwest Territories, Canada ». Exploration Mining Geology 10: 155-163.

Blowes, D.W. et J.L. Jambor. 1990. « The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide

tailings, Waite Amulet, Québec, Canada ». Appl. Geochem. 5: 327-346.

Blowes, D.W., C.J. Ptacek et J.L. Jambor. 1994. « Remediation and prevention of low-quality drainage from mine wastes », p. 365-380. *Dans* Jambor, J.L. et D.W. Blowes (s. la dir. de), « Short course handbook on environmental geochemistry of sulphide mine-wastes ». Association minéralogique du Canada, 22.

Blowes, D.W., E.J. Reardon, J.L. Jambor et J.A. Cherry. 1991. « The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulphide mine tailings ». Geochimica et Cosmochimica Acta 55: 965-978.

CIGB. 1996. Guide des barrages et retenues de stériles. Conception, construction exploitation et réhabilitation. Commission internationale des grands barrages. Bulletin N° 106. Programme des Nations Unies pour l'environnement. 239 p.

Coggans, C.J., D.W. Blowes, W.D. Robertson et J.L. Jambor. 1998. « The hydrogeochemistry of a nickel-mine tailings impoundment, Copper Cliff, Ontario ». Reviews in Economic Geology 6B: 447-465.

Davies, M.P. 2002. « Tailings impoundment failures: are geotechnical engineers listening? » Geotechnical News, septembre, 2002: 31-36.

Davis, A. et G.D. Ashenberg. 1989. « The aqueous geochemistry of the Berkeley Pit, Butte, Montana, U.S.A. » Appl. Geochem. 4: 23-36.

Eary, L.E. 1999. « Geochemical and equilibrium trends in mine pit lakes ». Appl. Geochem. 14: 963-987.

Environnement Canada. 2002. Utilisation industrielle de l'eau, 1996. Ministre des Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, Ottawa (Ontario).

Feasby, D.G., M. Blanchette et G. Tremblay. 1991. « The mine environment neutral drainage program », p. 1-26. *Dans* « Second international conference on the abatement of acidic drainage », Montreal (Québec), septembre 16-18, 1991.

Feasby, G. et G. Tremblay. 1995. « New technologies to reduce environmental liability from acid generating mine wastes », vol. 2, p. 643-647. *Dans* « Proceedings Sudbury '95 mining and the environment ».

Gouvernement du Canada. 1991. L'état de l'environnement au Canada. Ministère des Approvisionnements et Services, Ottawa.

Hudson-Edwards, K.A., M.G. Macklin, H.E. Jamieson, P.A. Brewer, T.J. Coulthard, A.J. Howard et J.N. Turner. 2003. « The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: the Ríos Agrio-Guadiamar, Aznalcóllar, Spain ». Appl. Geochem. 18: 221-239.

Jambor, J.L., D.K. Nordstrom et C.N. Alpers. 2000. « Metal-sulfate salts from sulphide mineral oxidation ». Reviews in Mineralogy and Geochemistry 40: 303-350.

Johnson, R.H., D.W. Blowes, W.D. Robertson et J.L. Jambor. 2000. « The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment, Sudbury, Ontario ». J. Contam. Hydrol. 41: 49-80.

Kleinmann, R.P.L. 1990. « Acid mine drainage: an overview », p. 281-282. *Dans* Hobbs, B.F. (s. la dir. de), « Proceedings of conference energy in the 90s ». American Society of Civil Engineering, New York.

Levy, D.B., K.H. Custis, W.H. Casey et P.A. Rock. 1997. « The aqueous geochemistry of the abandoned Spenceville Copper Pit, Nevada County, California ». J. Environ. Qual. 26: 233-243.

Macklin, M.G., P.A. Brewer, D. Balteanu, T.J. Coulthard, B. Driga, A.J. Howard et S. Zaharia. 2003. « The long term fate and environmental significance of contaminant metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramures County, upper Tisa Basin, Romania ». Appl. Geochem. 18: 241-257.

Martin, A.J., J.J. McNee et T.F. Pedersen. 2001. « The reactivity of sediments impacted by metal-mining in Lago Junin, Peru ». J. Geochem. Explor. 74: 175-187.

Miller, G.C., W.B. Lyons et A. Davis. 1996. « Understanding the water quality of pit lakes ». Environ. Sci. Technol. 30: 118-123A.

Moncur, M.C., C.J. Ptacek, D.W. Blowes et J.L. Jambor. 2003. « Fate and transport of metals from an abandoned tailings impoundment after 70 years of sulfide oxidation », p. 238-247. *Dans* « Proceedings of Sudbury '03, mining and the environment III », mai 2003, Sudbury (Ontario).

Morin, K.A. et N.M. Hutt. 1997. « Environmental geochemistry of minesite drainage: practical theory and case studies ». MDAG Publishing, Vancouver (C.-B.).

Nordstrom, D.K. et C.N. Alpers. 1999. « Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund site, California », p. 3455-3462. *Dans* « Proceeding of the National Academy of Science, U.S.A., 96 ».

Nordstrom, D.K., C.N. Alpers, C.J. Ptacek et D.W. Blowes. 2000. « Negative pH and extremely acidic mine waters from Iron Mountain, California ». Environ. Sci. Technol. 34: 254-258.

Price, W.A. 1999. « Regulation as a tool for reducing the risks associated with metal leaching and acid rock drainage ». Mine Reclamation Section, British Columbia Ministry of Energy and Mines. 29 p.

Price, W.A. 2001. « Use of fresh water covers as a mitigation strategy at mine sites in British Columbia ». *Dans* Price, W.A. (s. la dir. de), « New developments, different aspects of prediction and the use of water covers as a mitigation strategy. Presentations at the 8th Annual BC MEM - MEND Metal Leaching and ARD Workshop », Vancouver (C.-B.), novembre 28-29, 2001.

Price, W.A. et K. Bellefontaine. 2002. « Mitigation of metal leaching and acid rock drainage in environmental trends in British Columbia: 2002 ». British Columbia Ministry of Water, Land and Air Protection.

Price, W.A. et J. Errington. 1998. « Guidelines for metal leaching and acid rock drainage at minesites in British Columbia ». British Columbia Ministry of Energy and Mines. 86 p.

Price, W.A. et B. Hart (s. la dir. de). 1999. « Proceedings of workshop on molybdenum issues in reclamation ». British Columbia Committee on Molybdenum Issues in Reclamation. British Columbia Ministry of Energy and Mines.

Ramstedt, M., E. Carlsson et L. Lövgren. 2003. « Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, northern Sweden ». Appl. Geochem. 18: 97-108.

Roderick, M.L. et G.D. Farquhar. 2002. « The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years ». Science 298: 1410-1411.

Shevenell, L., K.A. Connors et C.D. Henry. 1999. « Controls on pit lake water quality at sixteen open-pit mines in Nevada ». Appl. Geochem. 14: 669-687.

Strachan, C. 2002. « Review of tailings dam incident data ». Mining Environment Management, janvier 2002: 7-9.

USDA. 1993. « Acid drainage from mines on the National Forest: a management challenge ». U.S. Forest Service Publication 1505, p. 1-12.

Vigneault, B., P.G.C. Campbell, A. Tessier et R. de Vitre. 2001. « Geochemical changes in sulfidic mine tailings stored under a shallow water cover ». Water Res. 35: 1066-1076.

Wireman, M. 2002. « Potential water-quality impact of hard-rock mining ». Ground Water Monit. Remediat., Summer: 40-51.

Yanful, E.K. et A. Verma. 1999. « Oxidation of flooded mine tailings due to resuspension ». Can. Geotech. J. 36: 826-845.

Chapitre 10

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – EAUX SOUTERRAINES

Alfonso Rivera[1], Diana M. Allen[2] et Harm Maathuis[3]

[1] Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, Québec (Qc)

[2] Université Simon Fraser, Département des sciences de la Terre, Burnaby (C.-B.)

[3] Conseil de recherche de la Saskatchewan, Saskatoon (Sask.)

Situation actuelle

On sait depuis longtemps que la variabilité et les changements climatiques naturels ont tous les deux un effet sur les niveaux d'eau des aquifères. Puisque les eaux souterraines constituent un élément important du cycle hydrologique, on peut donc prévoir qu'elles seront touchées par tous les changements climatiques sur les plans suivants : nature du processus d'alimentation, type d'interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface et changements dans l'utilisation de l'eau (l'irrigation par exemple). On s'attend à ce que des variations de la température et des précipitations modifient l'alimentation des aquifères, ce qui se traduirait dans un premier temps par une fluctuation des niveaux dans les aquifères libres (Changnon et al., 1988; Zektser et Loaiciga, 1993). La réduction de l'alimentation des nappes souterraines n'influera pas seulement sur l'approvisionnement en eau, mais probablement aussi sur la qualité de l'eau. De plus, en raison de la variation du débit de base des cours d'eau, des effets environnementaux nuisibles aux poissons et à d'autres animaux sauvages pourraient survenir (p. ex., Gleick, 1986). Parmi les autres répercussions possibles, mentionnons un déséquilibre dans les aquifères côtiers (p. ex., Custodio, 1987; Lambrakis, 1997; Vengosh et Rosenthal, 1994) ainsi qu'une réduction du volume d'eau emmagasiné dans les aquifères, accompagnée d'une possibilité d'affaissement accru du terrain (en Californie et à Mexico par exemple).

D'un point de vue régional ou national, la compréhension des effets de la variabilité et des changements climatiques sur les eaux souterraines – en termes de la disponibilité, la vulnérabilité et la durabilité de l'eau douce – demeure limitée. Deux facteurs importants, tel qu'expliqués ci-dessous, compliquent et limitent la compréhension de ces effets potentiels et empêchent de les mesurer directement.

Rythme d'alimentation – On définit la variabilité climatique comme une variation naturelle de haute fréquence du climat, souvent cyclique. En revanche, un changement climatique peut être naturel ou anthropique et exhibe des tendances à plus long terme. D'ordinaire, les effets de la variabilité du climat se manifestent rapidement dans les eaux de surface, mais ils sont souvent difficiles à observer dans les eaux souterraines du fait qu'ils y sont de moindre envergure et différés. Les variations à plus long terme du climat souvent se préservent bien dans les aquifères (p. ex., les effets sur le climat du Pléistocène). En conséquence, il est difficile de détecter et de quantifier l'ampleur et le moment d'apparition des conséquences de la variabilité ou des changements climatiques sur les aquifères en raison du délai qui s'écoule entre les variations climatiques et la réaction des aquifères.

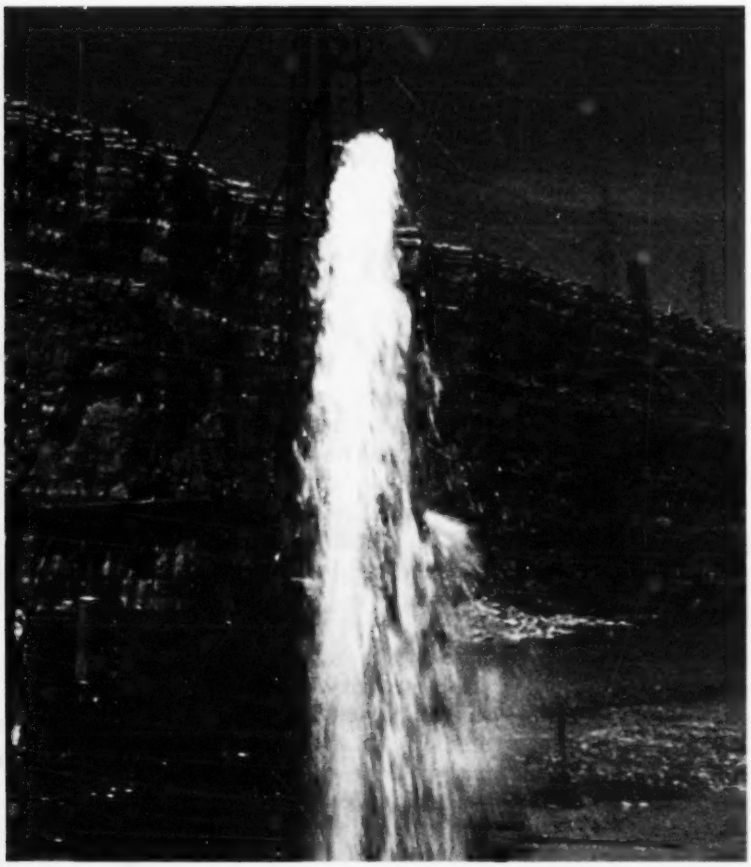
Nature des aquifères – Chaque type d'aquifère réagit différemment aux facteurs de stress qui s'exercent à la surface. Les aquifères peu profonds constitués d'un substratum altéré ou fracturé ou de sédiments meubles réagissent plus à ces facteurs de stress que les aquifères plus profonds, qui tendent à être davantage isolés des conditions régnant à la surface par les aquitards qui se situent au- dessus des aquifères plus profonds (p. ex., van der Kamp et Maathuis, 1991a). De la même façon, les aquifères peu profonds sont vulnérables aux changements climatiques locaux alors que les niveaux d'eau dans les aquifères plus profonds sont sensibles aux changements régionaux. En conséquence, la variabilité climatique, qui survient relativement à court terme comparativement au changement climatique, aura un impact plus important sur les aquifères peu profonds. En revanche, les aquifères profonds ont une grande capacité d'amortir les effets de la variabilité climatique et, par conséquent, sont en mesure de préserver les tendances à plus long terme inhérentes aux changements climatiques. Il importe toutefois de retenir que les aquifères profonds peuvent être vulnérables à la variabilité du climat. Étant donné que les eaux souterraines peu profondes sont de plus en plus limitées en quantité ou contaminées, les eaux souterraines plus profondes sont souvent exploitées (comme c'est le cas notamment au Texas).

Tendances

Données sur les niveaux des eaux souterraines

Les données sur les niveaux des eaux souterraines permettent de mesurer directement les effets des changements naturels et anthropiques sur les eaux souterraines. Les facteurs de stress occasionnés par ces changements se répercutent sur les aquifères aux plans suivants : leur alimentation en eau, le stockage de l'eau, et leur débit (p. ex., Taylor et Alley, 2001; Gilliland, 1967) et, généralement, modifient ou perturbent l'équilibre hydrique global. La plupart des évaluations hydrogéologiques menées aux fins de la caractérisation, de la modélisation et de l'évaluation du rendement d'aquifères incluent une analyse et une interprétation de données à partir d'hydrogrammes de puits.

Même si certains réseaux de nappes d'eau souterraine sont exploités depuis des décennies, seulement quelques publications présentent une interprétation des hydrogrammes. Gabert (1986) et Maathuis et van der Kamp (1986) ont fourni une évaluation qualitative d'hydrogrammes pour l'Alberta et la Saskatchewan, respectivement. En outre, van der Kamp et Maathuis (1991a) et van der Kamp et Schmidt (1997) ont démontré que des hydrogrammes d'aquifères semi-captifs profonds peuvent être employés pour évaluer l'humidité du sol à une échelle régionale. Jusqu'ici, peu d'efforts ont été consentis au Canada pour relier des hydrogrammes aux variables climatiques (p. ex., Rutulis, 1989; Chen et Grasby, 2001; Rivard et al., 2003). En outre, on ne s'est pas servi systématiquement de données hydrographiques pour établir de façon spécifique l'effet de la variabilité climatique sur les aquifères et les eaux souterraines.



L'eau souterraine est une ressource précieuse qui peut être altérée par l'utilisation des terres et les changements climatiques.

Effets potentiels

Voici une description de certains des effets majeurs que la variabilité et les changements climatiques peuvent avoir sur les eaux souterraines.

Alimentation – Les changements spatiotemporels de la température et des précipitations peuvent agir pour modifier les conditions hydrauliques limites à la surface d'un aquifère et, en bout de ligne, le bilan hydrique de ce dernier. Ainsi, les variations du volume des précipitations, leur rythme et le type de précipitations sont tous des facteurs clés qui déterminent le volume et le rythme d'alimentation des aquifères. On observe souvent que les niveaux d'eau dans un aquifère varient régulièrement en fonction des précipitations, bien que la nature de cette variation puisse être complexe et qu'elle dépende notamment de la période de l'année et des conditions antérieures. Ces données peuvent être employées pour l'étalonnage de modèles numériques parce qu'elles constituent un relevé temporel de la réaction de l'aquifère aux divers régimes d'alimentation. Dans la plupart des cas, l'incidence des précipitations est positive; elle est légèrement retardée dans l'aquifère, s'atténue avec la profondeur et est plus marquée dans les aquifères libres que dans les aquifères semis-captifs. Cependant, des études récentes ont révélé qu'une augmentation des précipitations annuelles ne se traduisait pas nécessairement par une alimentation accrue, comme on pourrait le croire (p. ex., Rivard et al., 2003; Nastev et al., 2002).

On peut également s'attendre à ce que des sécheresses ou de fortes précipitations agissent sur les niveaux d'eau dans les aquifères. La baisse des niveaux d'eau que les sécheresses entraînent n'est pas seulement attribuable à une pluviosité réduite, mais aussi à une évaporation accrue et à une infiltration moindre qui peut se manifester à cause de l'assèchement de terres arables. Des précipitations extrêmes (p. ex., fortes pluies et tempêtes) peuvent se traduire par une alimentation réduite des nappes d'eaux souterraines, car les eaux de précipitations seront en grande partie perdues par ruissellement. Cependant, au Manitoba, de fortes précipitations isolées, survenant une fois à intervalle de dix ou de cinquante ans, peuvent « remplir » des aquifères qui ont connu des baisses pendant plusieurs années consécutives (Betcher, communication personnelle). Ainsi, même si une région peut connaître des précipitations

cumulatives plus importantes, l'alimentation totale de l'aquifère peut être inférieure.

Les variations de la température et des précipitations, ainsi que d'autres facteurs comme la vitesse du vent et la végétation, ont un effet sur l'évapotranspiration. La mesure de l'évapotranspiration est difficile même lorsqu'on dispose de données spécifiques sur un emplacement. Il est particulièrement ardu de prévoir, pour un aquifère, les variations dans les taux et l'ampleur de l'évapotranspiration que peut provoquer le changement climatique et, par conséquent, son impact sur les ressources en eau. Jusqu'ici, cette question a été abordée dans peu d'études.

Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface – Il existe de fortes interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans de nombreuses régions du Canada. Ces mécanismes importants doivent être pris en considération parce qu'ils jouent un rôle déterminant dans le soutien des écosystèmes. En raison de l'étroite relation qui existe entre les eaux souterraines et les eaux de surface, ces ressources doivent être traitées comme une ressource intégrée et non séparément.

Voici une énumération non exhaustive des interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

- Milieux humides : dans certaines régions, ces milieux sont soutenus par les eaux souterraines et interagissent fortement avec celles-ci.
- Débit : soutenu par les eaux souterraines lorsque les précipitations directes sont insuffisantes (débit de base) (Arnell, 1996).
- Cours d'eau infiltrants : contribuent à l'alimentation des aquifères.
- Sources : émergence des eaux souterraines.
- Eaux côtières : reçoivent de l'eau douce souterraine émergente qui sert à soutenir des écosystèmes délicats.

Ainsi, la variabilité climatique, qui se répercute sur l'ensemble de ces milieux, n'influera pas uniquement sur les ressources en eaux souterraines; elle aura des effets sur les aquifères qui, à leur tour, toucheront chacun de ces milieux. Par exemple, une modification de la courbe de débit des cours d'eau peut avoir une incidence importante sur les niveaux d'eau dans les aquifères. Dans divers scénarios de changement climatique pour la Colombie-Britannique, on prévoit pour un grand nombre de cours d'eau un débit maximal plus élevé ainsi qu'une apparition plus précoce des débit de base, qui se maintiendront plus longtemps (Leith et Whitfield, 1998). Dans le cas des aquifères qui bénéficient d'une bonne liaison hydraulique avec des cours d'eau, les crues printanières pourraient donner lieu à une hausse des nappes phréatiques, et la baisse de ces dernières se déroulera sur une plus longue période, soit jusqu'à la fin de l'été ou au début de l'automne. La diminution du ruissellement des glaciers au cours des prochaines décennies aura également un impact considérable sur bien des réseaux de cours d'eau et d'aquifères, car ce sont les glaciers qui soutiennent les débits de base des cours d'eau et les niveaux d'eau dans les aquifères pendant les derniers mois de l'été (Brugman et al., 1997).

Régimes d'écoulement

La variabilité et les changements climatiques peuvent être des points importants à prendre en considération dans l'examen des variations globales du régime d'écoulement. Des aquifères côtiers sont utilisés ici à titre d'exemple, mais d'autres aquifères complexes (dont la densité, le niveau de contamination ou la qualité naturelle pourraient différer) peuvent être touchés de la même manière. Les aquifères côtiers sont sensibles aux changements du bilan hydrique en raison de l'interaction entre l'eau douce et l'eau salée dans la subsurface le long des côtes. Lorsque l'alimentation diminue, l'interface eau douce-eau salée se déplace vers l'intérieur des terres à un rythme proportionnel à la baisse de l'alimentation, et la qualité de l'eau peut être compromise au point de limiter l'eau douce disponible. Les variations du niveau de la mer qui pourraient accompagner un changement climatique agissent également sur la position de cette interface. L'aménagement du territoire, qui a connu une hausse dans la plupart des régions côtières du Canada (p. ex., en Nouvelle-Écosse, à l'Île-du-Prince-Édouard et dans la vallée du bas Fraser, en Colombie-Britannique) complique les choses. Il se peut que le pompage accru des eaux souterraines provoque le soulèvement ou l'empiétement de l'interface eau douce-eau salée.

Réserves souterraines

La variabilité et le changement climatiques se répercutent sur l'alimentation et le débit des aquifères et, par conséquent, sur leurs réserves globales en eaux souterraines. À long terme, et en l'absence de changements importants aux bilans annuels dus, par exemple, au pompage des eaux souterraines, le bilan hydrique d'un aquifère est généralement dans un état d'équilibre dynamique. Cela signifie que le climat varie de façon cyclique et agit sur les niveaux d'eau, mais qu'à long terme, l'aquifère maintient un état d'équilibre dynamique. La variabilité à court terme (ou à moyen terme) apparaît dans les hydrogrammes comme une variation cyclique. Les tendances à long terme dans les hydrogrammes qui se superposent aux variations de haute fréquence reflètent des changements dans les réserves d'eaux souterraines qui peuvent résulter d'une surexploitation (pompage excessif) ou d'un changement climatique. Lorsque de l'eau est extraite d'une réserve souterraine, les niveaux d'eau dans l'aquifère chutent, et lorsque la réserve est alimentée, les niveaux d'eau montent. Dans les aquifères qui contiennent des couches

ou des lamelles de matériaux géologiques qui se tassent facilement (p. ex., de l'argile), les pertes d'une réserve peuvent potentiellement augmenter la contrainte effective sur les unités géologiques, laquelle mène au tassement et à l'affaissement du sol.

Demande accrue

L'augmentation de l'irrigation est peut-être la cause la plus évidente de l'accroissement possible de la demande en eau souterraine en vue de fournir une autre source d'approvisionnement en eau ou de l'augmenter. D'un point de vue général, les effets des changements climatiques peuvent limiter la capacité d'autres pays à produire des denrées. Une augmentation des exportations de denrées alimentaires canadiennes se traduira par une plus grande consommation d'eau douce au pays, dont une partie proviendra très certainement des réserves souterraines.

L'accroissement des activités de lotissement et l'évolution ou l'intensification de l'utilisation du sol annoncent aussi des variations possibles de la demande en eau souterraine. Même si ces effets dépendront en grande partie de l'accroissement de la population, la variabilité et les changements climatiques sont susceptibles de jouer un certain rôle. Par exemple, si les effets sur les aquifères peu profonds sont significatifs, certaines régions devront peut-être se mettre à la recherche d'autres ressources en eaux souterraines dans des aquifères plus profonds. En conséquence, la demande totale pourrait chuter pour quelques aquifères, tandis qu'elle pourrait augmenter pour d'autres.

La possibilité d'une alimentation moindre des aquifères peut être pour bien des régions un facteur limitant l'eau disponible. Cette situation survient surtout lorsque les pertes par évapotranspiration sont supérieures dans des conditions de changement climatique et lorsque de plus grandes quantités d'eau doivent être prélevées pour répondre notamment aux besoins de l'agriculture et des populations croissantes.

Études d'impact

Au Canada, la plupart des recherches sur les effets que peuvent avoir les changements climatiques sur le cycle hydrologique sont axées sur la prévision des effets potentiels sur les eaux de surface, et spécifiquement sur les liens existant entre le ruissellement des glaciers et le débit des cours d'eau (p. ex., Whitfield et Taylor, 1998; Leith et Whitfield, 1998). Peu de recherches ont été menées pour déterminer la vulnérabilité des aquifères au changement des variables clés du changement climatique, des précipitations et de la température. À l'échelle internationale, seules quelques études ont été mentionnées dans la littérature sur les effets des changements climatiques (fondés sur des scénarios de prévision) sur les ressources en eaux souterraines (p. ex., Vaccaro 1992; Rosenberg et al., 1999; McLaren et Sudicky, 1993). L'alimentation des aquifères et les niveaux des eaux souterraines agissent l'un sur l'autre et dépendent du climat ainsi que de l'utilisation des eaux souterraines; chaque aquifère présente des caractéristiques différentes et commande une caractérisation détaillée et, éventuellement, une quantification (p. ex., modélisation numérique) de ces processus ainsi que la mise en relation des prévisions obtenues à partir des modèles d'alimentation des aquifères et des modèles climatiques (York et al., 2002).

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Pour que nous puissions accroître nos connaissances sur la disponibilité des eaux souterraines – première étape de l'évaluation des effets des changements climatiq... –, nous devons mener des études approfondies dans plusieurs domaines clés.

Inventaire des ressources

Même sans changement climatique, une augmentation de la demande en eau est prévisible en raison de la croissance de la population, de l'industrialisation continue et de la demande du secteur agricole. Par ailleurs, la protection des eaux souterraines et des eaux de surface au moyen de directives sur l'aménagement du territoire s'impose de plus en plus. En conséquence, le besoin d'inventaires et de caractérisation des ressources des aquifères ira toujours croissant, en particulier dans les régions fortement peuplées.

Lacunes sur le plan des connaissances

- Les effets de la variabilité et des changements climatiques varieront partout au Canada, non seulement en raison des conditions climatiques qui diffèrent d'une région à l'autre, mais aussi en raison de la nature du système d'eaux souterraines touché. Des études de cas régionales incluant la caractérisation détaillée des aquifères doivent être menées si nous voulons améliorer notre compréhension des effets potentiels de la variabilité et des changements climatiques sur les eaux souterraines.
- Les effets de la variabilité et des changements climatiques sur l'alimentation des nappes souterraines sont encore méconnus et constituent une lacune importante des modèles d'eaux souterraines dont nous disposons.
- La dynamique de l'interaction entre les aquifères peu profonds et les eaux de surface est méconnue et peu étudiée au Canada.

Afin de combler ces lacunes, il est essentiel de disposer de données climatiques et hydrologiques, à la fois historiques et projetées, qui permettront d'évaluer les variations du bilan hydrique global et du régime d'écoulement des aquifères et de gérer la ressource à l'avenir.

Trois études sur les eaux souterraines au Canada portant sur les effets de la variabilité et des changements climatiques

Bassin des Grands Lacs

Les effets des changements climatiques sur les eaux souterraines du bassin des Grands Lacs ont été évalués au moyen de prototypes du bassin hydrologique de la rivière Grand et de la région du sud-ouest de l'Ontario. On a eu recours à des méthodes d'analyse allant de la modélisation des eaux souterraines à l'échelle régionale jusqu'à l'analyse du débit pour déterminer le niveau des eaux souterraines et leur débit de base en fonction de conditions climatiques historiques et futures.

Le Fonds d'action pour le changement climatique du gouvernement du Canada a financé des études menées dans le sud-ouest de l'Ontario. Ces études ont été réalisées par l'Institut national de recherche sur les eaux et le Service météorologique du Canada en collaboration avec la Commission géologique du Canada et les ministères de l'Environnement et des Richesses naturelles de l'Ontario (p. ex., Piggott et al., 2001). On a séparé les données sur l'écoulement des cours d'eau d'un réseau de 174 bassins hydrographiques en composantes de ruissellement de surface et de débit d'eaux souterraines afin de les analyser dans un contexte de séries chronologiques. Les résultats de cette analyse indiquent que pas moins de 75 % de l'eau provenant de la fonte des neiges et de la pluie est disponible aux fins de ruissellement et d'alimentation des eaux souterraines pendant l'hiver, alors que seulement 10 % de cette eau est disponible pendant l'été. La partie de ces précipitations excessives qui alimentent les eaux souterraines est une fonction physiographique et varie de 10 à 80 % lorsqu'elle est calculée pour chaque bassin hydrographique. La vitesse à laquelle l'eau d'alimentation s'écoule ensuite (débit de base) et, par conséquent, la persistance de cet écoulement est également une fonction physiographique.

On a combiné ces résultats à deux scénarios de changement climatique pour déterminer les effets potentiels sur l'état des eaux souterraines. Si on considère tous les bassins hydrologiques étudiés, les deux scénarios se sont traduits par une augmentation moyenne de 19 % et une diminution moyenne de 3 %, respectivement, du débit de base annuel total. Les deux scénarios ont également indiqué un effet significatif, et plus régulier, sur la distribution des valeurs de débit de base sur une période d'un an. L'étude prévoyait des débits accrus pendant l'hiver en raison d'une réduction de l'accumulation de neige et des débits inférieurs, imputables à la diminution correspondante de la fonte de neige, au printemps et au début de l'été. Ces résultats indiquent clairement la possibilité d'effets significatifs sur les eaux souterraines et, par conséquent, sur les approvisionnements d'eau, les conditions dans les cours d'eau et l'habitat aquatique. Ces effets découlent uniquement de l'interaction entre le climat et les eaux souterraines; on s'attend aussi à des effets dus à un changement d'utilisation de l'eau.

Aquifère carbonaté de Winnipeg

La recherche sur l'aquifère carbonaté régional de Winnipeg a démontré que les charges hydrauliques d'eau douce, mesurées au sud-ouest de Winnipeg, empêchent des eaux souterraines salines situées du côté ouest de la rivière Rouge de migrer vers l'est. Elle a également démontré que les cours d'eau influent grandement sur la limite entre l'eau saline et l'eau douce (Charron, 1965; Grasby et Betcher, 2002). Charron (1965) a établi que cette limite se trouvait à l'ouest de la rivière Rouge et au sud de la rivière Assiniboine au début du XX^{e} siècle. Il a également indiqué que, dans cette même période, un pompage important dans la zone d'eau douce a permis à l'eau saline de traverser les rivières et d'atteindre des zones d'eau douce de la région de Winnipeg. De plus, un déplacement de la limite à l'est a été observé à la suite de l'assèchement nécessaire à la construction du canal de dérivation de Winnipeg (Render, 1970). Grâce à la diminution du pompage au cours des 30 dernières années, la limite a regagné sa position initiale. Chen et Grasby (2001) ont analysé les niveaux de puits d'eau de Winnipeg, mis au point un modèle analytique et effectué des simulations pour évaluer les effets des changements climatiques à long terme sur les niveaux d'eau dans les parties de l'aquifère qui renferment de l'eau douce.

Au moyen d'une relation empirique entre les variables clés du climat, on a relié les précipitations et la température à l'alimentation des eaux souterraines, et par conséquent, la charge hydraulique dans l'aquifère, à partir de données historiques relatives à un réseau de puits de surveillance (Chen et al., 2002). Le modèle empirique a pu prévoir des charges hydrauliques à partir de données de précipitations et de température. Dans des scénarios de changements climatiques futurs, on a utilisé des tendances projetées de la température et des précipitations pour calculer des charges hydrauliques à divers points de l'aquifère pour l'année 2030.

Dans quelques scénarios climatiques, la charge hydraulique de la zone d'eau douce a changé radicalement à partir de 2000. Selon les baisses de charge hydraulique prévues près de la rivière Rouge, au sud-est de Winnipeg, la limite eau saline-eau douce pourrait se déplacer vers l'est sous l'effet du changement de climat et entraîner la salinisation des puits d'eau.

Aquifère de Grand Forks, en Colombie-Britannique

Allen et al. (sous presse) ont effectué une analyse intégrée de la sensibilité aux changements climatiques de l'aquifère de Grand Forks, situé dans le centre-sud de la Colombie-Britannique. Ils ont pris en considération les variables du climat et les changements de l'hydrologie de surface. Des gammes de précipitations et de températures, projetées à partir des sorties du modèle de circulation générale pour la région climatique des montagnes du sud de la Colombie-Britannique, ont été utilisées pour estimer des valeurs minimales et maximales pour l'alimentation. Ces valeurs ont ensuite été intégrées à un modèle hydrogéologique numérique de l'aquifère. La sensibilité des niveaux d'eau de l'aquifère aux changements du niveau des cours d'eau a également été étudiée. Puisque l'aquifère de Grand Forks donne lieu à de fortes interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface des rivières Kettle et Granby, les niveaux d'eau des cours d'eau se sont avérés beaucoup plus sensibles à la variation du niveau des cours d'eau lui-même qu'à la variation de l'alimentation de la nappe souterraine. On procède à des travaux sur le comportement temporel et saisonnier du système afin d'étudier les changements sur le plan du stockage qui pourraient jouer un rôle important dans la résolution des questions relatives à la demande pendant les mois d'été secs.

Surveillance

Les mesures des niveaux des eaux souterraines faites à partir de puits d'observation sont la principale source d'information sur les effets des facteurs stress de nature hydrologique sur des systèmes d'eaux souterraines. Il est essentiel que soient disponibles ces données ainsi que des relevés des précipitations et des données sur les débits et les prélèvements pour surveiller l'efficacité des plans de gestion et de protection des eaux souterraines. Comme dans le cas des données sur le climat et les débits, la valeur des données sur les niveaux des eaux souterraines augmente à mesure que s'accroissent la période couverte par ces données et leur continuité. Des données sur les niveaux des eaux souterraines provenant de puits d'observation sont disponibles pour chaque province (Maathuis, en préparation). Cependant, contrairement aux données sur le climat et les débits, pour lesquelles il peut exister des relevés s'échelonnant sur une période allant jusqu'à 100 ans, les relevés sur les niveaux des eaux souterraines couvrent d'ordinaire une période inférieure à 25 ans et rarement supérieure à 40 ans. De plus, peu de puits sont stratégiquement situés près de stations climatologiques ou hydrométriques, ce qui rend toute analyse et toute comparaison difficiles. Enfin, au cours de la dernière décennie, les réseaux d'observation ont souffert de compressions budgétaires qui ont donné lieu à la réduction du nombre de puits d'observation des eaux souterraines et à l'interruption de la continuité des relevés.

Les données sur les prélèvements d'eaux souterraines sont tout aussi importantes pour l'évaluation du comportement des niveaux d'eau dans les aquifères. Sans ces données, il est impossible de dissocier l'effet du pompage de l'effet de la variabilité et des changements climatiques. Bien que dans de nombreuses parties du Canada, on exige un permis pour prélever des eaux souterraines à des fins non domestiques, il arrive souvent qu'aucune donnée fiable sur les prélèvements ne soit disponible.

Les données disponibles pour appuyer toute preuve de l'effet de la variabilité et des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines sont insuffisantes et couvrent une très courte période. En conséquence, la collecte de données à long terme suivantes est essentielle.

Données sur les niveaux d'eau – Il faudrait établir un réseau pancanadien de puits d'observation pour la surveillance à long terme des niveaux des eaux souterraines. Le réseau devrait comprendre des puits situés dans des milieux perturbés et des milieux naturels intacts. Il devrait également être relié aux réseaux climatologiques et hydrométriques.

Données sur les prélèvements d'eau souterraine – Des données sur les prélèvements (pompage) d'eau souterraine sont essentielles à l'interprétation appropriée des données sur les niveaux d'eau et constituent un paramètre de base pour alimenter les modèles sur les eaux souterraines.

Modélisation

On pourrait utiliser des modèles d'eaux souterraines bien étalonnés pour simuler et prévoir les effets possibles des changements climatiques sur la durabilité des ressources en eaux souterraines. Ces modèles devraient être conçus pour simuler et prévoir :

- les modifications de l'état des eaux souterraines imputables à l'homme (pompage);
- les interactions avec les eaux de surface (rivières, cours d'eau, lacs et milieux humides);
- la variabilité climatique (à l'échelle du cycle hydrologique);
- les changements climatiques (à long terme).

De plus, les modèles peuvent être d'excellents outils de gestion de l'eau lorsqu'ils sont utilisés pour évaluer le rendement soutenu naturel d'aquifères et leur vulnérabilité à la contamination.

Considérations d'ordre institutionnel

On recommande également de promouvoir au plan institutionnel :

- des approches à l'échelle du bassin hydrographique en ce qui a trait à la gestion et à la protection des ressources en eau;
- une collaboration accrue entre les organismes fédéraux et provinciaux visés concernant l'instauration et l'exploitation de réseaux de surveillance;
- des mesures favorisant l'établissement de liens entre les spécialistes de l'eau et les gestionnaires de l'eau;
- la gestion intégrée des ressources en eau;
- un réseau de bases de données sur les eaux souterraines compatibles (à savoir, normalisées);
- un inventaire des ressources en eaux souterraines.

Références

Allen, D.M., D.C. Mackie et M. Wei. « Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada ». Hydrogeology Journal. Sous presse.

Arnell, N. 1996. « Global warming, river flows and water resources ». John Wiley and Sons. Chichester, Angleterre.

Betcher, R.N. Communication personnelle.

Brugman, M.M., P.A. Raistrick et A. Pietroniro. 1997. « Glacier related impacts of doubling atmospheric carbon dioxide concentrations on British Columbia and Yukon ». *Dans* Taylor, E. et B. Taylor (s. la dir. de), « Responding to global climate change in British Columbia and Yukon.

Volume I – Canada country study: climate impacts and adaptation ». Environnement Canada et B.C. Ministry of Environment, Lands and Parks.

Changnon, S.A., F.A. Huff et C.-F. Hsu. 1988. « Relations between precipitation and shallow groundwater in Illinois ». J. Climate 1: 1239-1250.

Charron, J.E. 1965. « Groundwater resources of Winnipeg area, Manitoba ». Commission géologique du Canada, « Paper 64-23 ».

Chen, Z. et S. Grasby. 2001. « Predicting variations in groundwater levels in response to climate change, upper carbonate rock aquifer, southern Manitoba ». Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, Calgary.

Chen, Z., S.E. Grasby et K.G. Osadetz. 2002. « Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model ». J. Hydrol. 260: 102-117.

Custodio, E. 1987. « Seawater intrusion in the Llobregat Delta, near Barcelona (Catalonia, Spain) », p. 436-463. *Dans* « Groundwater problems in coastal areas. Studies and reports in hydrogeology, no. 45 ». UNESCO, Paris.

Gabert, G.M. 1986. « Alberta groundwater observation-well network. Alberta Research Council, Terrain Sciences Department, Earth Sciences Report, 86-1 ». 40 p.

Gilliland, J.A. 1967. « Observation-well program. Department of Energy, Mines and Resources, Inland Waters Branch». 30 p.

Gleick, P.H. 1986. « Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes ». J. Hydrol. 88: 97-116.

Grasby, S.E. et R.N. Betcher. 2002. « Regional hydrogeochemistry of the carbonate rock aquifer, southern Manitoba ». Can. J. Earth Sci. 39: 1053-1063.

Lambrakis, N. 1997. « The impact of urbanisation of Malia coastal area (Crete) on groundwater quality ». Environ. Geol. 36: 87-92.

Leith, R.M.M. et P.H. Whitfield. 1998. « Evidence of climate change effects on the hydrology of streams in south-central British Columbia ». Can. Water Resour. J. 23(3): 219-230.

Maathuis, H. « Groundwater level observation well networks in Canada ». Saskatchewan Research Council. En cours de rédaction.

Maathuis, H. et G. van der Kamp. 1986. « Groundwater observation well network in Saskatchewan, Canada », p. 565-581. *Dans* « Proceedings of Canadian Hydrology Symposium No. 16 », Conseil national de recherches du Canada, NRCC No. 25514.

McLaren, R.G. et E.A. Sudicky. 1993. « The impact of climate change in groundwater. Impacts of climatic change on water in the Grand River basin Ontario ». Université de Waterloo, « Department of Geography Publications series », vol. 40.

Nastev, M., A. Rivera, R. Lefebvre et M.M. Savard. 2002. « Hydrology and numerical simulation of the regional groundwater flow of the St. Lawrence Lowlands of Southwestern Quebec ». Soumis pour publication.

Piggott, A., D. Brown, B. Mills et S. Moin. 2001. « Exploring the dynamics of groundwater and climate interaction », p. 401-408. *Dans* « Proceedings of the 54th Canadian Geotechnical and 2nd . Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference. Canadian Geotechnical Society and the Canadian National Chapter of the International Association of Hydrogeologists ».

Render, F.W. 1970. « Geohydrology of the Metropolitan Winnipeg area as related to groundwater supply and construction ». Can. Geotech. J. 7: 243-274.

Rivard, C., J. Marion, Y. Michaud, S. Benhammane, A. Morin, R. Lefebvre et A. Rivera. 2003. Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada, Commission géologique du Canada, dossier public 1577. 39 p. et annexes.

Rosenberg, N.J., D.J. Epstein, D. Wang, L. Vail, R. Srinivasan et J.G. Arnold. 1999. « Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala aquifer region ». Climatic Change 42: 677-692.

Rutulis, M. 1989. « Groundwater draught sensitivity of Southern Manitoba ». Can. Water Resour. J. 14(1): 18-55.

Taylor, C.J. et W.M. Alley. 2001. « Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data ». U.S. Geological Survey, Circular 1217. 68 p.

Vaccaro, J.J. 1992. « Sensitivity of groundwater recharge estimates to climate variability and change, Columbia Plateau, Washington ». *Dans* Lettenmaier, D.P. et D. Rind (s. la dir. de), « Hydrological aspects of global climate change ». J. Geophys. Res. D Atmospheres 97(3): 2821-2833.

van der Kamp, G. et H. Maathuis. 1991a. « Annual fluctuations of groundwater levels as a result of loading by surface moisture ». J. Hydrol. 127(1-4): 137-152.

van der Kamp, G. et H. Maathuis. 1991b. « Groundwater levels and climate change », p. 143-147. *Dans* « Proceedings of NHRI Symposium No. 8, Using hydrometric data to detect and monitor climatic change », avril 1991.

van der Kamp, G. et R. Schmidt. 1997. « Monitoring of total soil moisture on a scale of hectares using groundwater piezometers ». Geophys. Res. Lett. 24(6): 719-722.

Vengosh, A. et E. Rosenthal. 1994. « Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country ». J. Hydrol. 156: 389-430.

Whitfield, P.H. et E. Taylor. 1998. « Apparent recent changes in hydrology and climate of coastal British Columbia », p. 22-29. *Dans* « Mountains to sea: human interaction with the hydrologic cycle , Proc. Canadian Water Resources Association 51st Annual Conference », Victoria, C.-B.

York, J.P., M. Person, W.J. Gutowski et T.C. Winter. 2002. « Putting aquifers into atmospheric simulation models: an example from the Mill Creek Watershed, north-eastern Kansas ». Adv. Water Resour. 25: 221-238.

Zektser, I.S. et H.J. Loaiciga. 1993. « Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present, and future ». J. Hydrol. 144: 405-442.

Chapitre 11

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – COURS D'EAU

Paul H. Whitfield[1], Paul J. Pilon[2], Donald H. Burn[3], Vivek Arora[4], Harry F. Lins[5], Taha Ouarda[6], C. David Sellars[7] et Christopher Spence[8]

[1] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Vancouver (C.-B.)

[2] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Burlington (Ont.)

[3] Université de Waterloo, Département de génie civil, Waterloo (Ont.)

[4] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, CCmA (Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique), Victoria (C.-B.)

[5] USGS Water Resources Division, Reston, Virginia, États-Unis

[6] INSR-Eau, Sainte-Foy (Qc)

[7] Experts-conseils en gestion des eaux, Vancouver (C.-B.)

[8] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Yellowknife (T.N.-O.)

Situation actuelle

Les Canadiens montrent un attachement culturel profond envers l'eau, qui constitue une facette importante de leur patrimoine, de leur spiritualité et de leur économie. Le Canada est considéré, souvent avec envie, comme une partie du monde possédant d'abondantes ressources en eau qui ont conservé essentiellement leur état d'origine. Bien que cela soit vrai en général, il ne faut pas oublier que le Canada comprend également des régions semi-arides et sensibles à des écarts, mêmes minimes, par rapport aux précipitations moyennes. D'autres régions en apparence bien pourvues, telles que le bassin des Grands Lacs, ne sont pas à l'abri d'une surexploitation locale des ressources en eau. En outre, la menace que font peser les changements climatiques sur les précieuses ressources en eau du Canada suscite des préoccupations grandissantes. Des chercheurs (Adamowski et Bocci, 2001; Burn et Hag Elnur, 2002; Cunderlik et Burn, 2002; Pilon et Yue, 2002; Whitfield et Cannon, 2000; Yue et al., 2000a, 2000b; Zhang et al., 2001) se sont récemment penchés sur les tendances caractérisant le débit des cours d'eau qui traversent les bassins naturels du Canada. Des analyses ont été menées sur différents aspects du régime hydrique, dont les comportements saisonniers et les conditions d'écoulement moyennes et leurs extrêmes.

Ces études révèlent que les comportements et les tendances observés diffèrent largement d'une région à l'autre et qu'il n'existe pas de manière simple de décrire les cours d'eau naturels du Canada. Les mesures individuelles prises aux stations hydrométriques indiquent que le débit annuel minimal et le débit journalier moyen affichent de fortes tendances à la hausse dans le nord de la Colombie-Britannique, au Yukon et dans le sud de l'Ontario, les tendances à la baisse se concentrant dans le sud de la Colombie-Britannique (voir la figure 1). Les études montrent des tendances à la baisse marquées du débit maximal dans la majeure partie du Canada, comme Lins et Slack (1999) l'ont rapporté pour les États-Unis. Il est certain que des changements se produisent, mais les mécanismes qui sous-tendent ces changements sont fort complexes. À l'heure actuelle, on ne peut pas dire que ceux-ci découlent entièrement soit des changements climatiques – causés par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre – soit de la variabilité naturelle du climat. Les analyses reposant sur les observations faites au cours des dernières décennies entrent parfois en contradiction avec les simulations hydrologiques obtenues à partir des modèles de circulation générale (MCG). D'un point de vue hydrologique, l'écart observé entre les résultats d'analyses rétrospectives et ceux à partir des modèles n'est pas sans soulever des préoccupations.

Toutes les études susmentionnées reposent sur les données du Réseau hydrométrique de référence (Harvey et al., 1999; Pilon et Kuylenstierna, 2000). Ce réseau, qui est actuellement moins étendu qu'il l'était au moment de sa conception initiale, se compose de plus de 200 stations hydrométriques couvrant des bassins pour lesquels les données hydrométriques ont été prélevées pendant au moins vingt ans et dans des conditions stables ou essentiellement non perturbées. Les stations hydrométriques du Réseau hydrométrique de référence, tel que le sous-ensemble illustré à la figure 1, sont d'une importance particulière pour les études des changements et de la variabilité climatiques; cependant, l'analyse des caractéristiques de ces stations laisse entrevoir certaines limites. Le réseau tend à englober de grands bassins dans le Nord et des bassins de plus petites dimensions dans le Sud. Qui plus est, il y aurait de grandes trouées dans la couverture spatiale de cer-

taines provinces. Voilà qui montre bien l'importance que revêt l'octroi d'un financement permanent à long terme aux activités visant expressément à recueillir des données hydrologiques aux fins de la surveillance des conditions ambiantes, tout comme la nécessité de compléter le réseau actuel pour qu'on puisse y rattacher les plus petits bassins du Nord et combler ses principales trouées géographiques. Il est peu probable que l'approche canadienne actuelle – laquelle repose sur la collecte de données visant à répondre à des besoins immédiats, dont la production d'hydroélectricité, l'exploitation d'ouvrages de lutte contre les crues et la répartition des ressources – permette de mettre en place un réseau capable de fournir les données de base requises pour évaluer l'incidence des changements et de la variabilité climatiques sur nos ressources en eau. Il est nécessaire que des fonds suffisants soient alloués à la mise en oeuvre de ce processus de collecte de données à long terme.

Depuis sa dernière publication en 1977, l'Atlas hydrologique du Canada n'avait fait l'objet d'aucune mise à jour en fonction des changements qui se sont produits dans des comportements historiques. Aujourd'hui, il nous faut des techniques plus dynamiques pour évaluer de manière appropriée les quantités d'eau disponibles actuellement. Le Canada ne devrait-il pas être en mesure de connaître quelles sont les quantités d'eau dont il dispose actuellement et quels sont les changements susceptibles d'affecter la disponibilité de ses ressources en eau, à l'échelle régionale et locale, que ce soit pour les bassins soumis à une régulation ou les bassins naturels?

Sur les bords du fleuve Yukon. Des études indiquent une augmentation des débits annuels dans le nord de la Colombie-Britannique, au Yukon et dans le sud de l'Ontario et une baisse dans le sud de la Colombie-Britannique.

Beaucoup d'efforts ont été déployés pour faire avancer la connaissance des processus hydrologiques à petite échelle (Buttle et al., 2000). Par ailleurs, les chercheurs canadiens ont mis au point des systèmes de modélisation pour la gestion des ressources en eau. Cependant, les modèles à plus grande échelle, accessibles aux spécialistes, tels que WATFLOOD (Kouwen et Mousavi, 2002) et SLURP (Kite, 1995), ne reposent pas sur la connaissance des processus physiques tirée des études hydrologiques à petite échelle. La modélisation des conditions d'écoulement des cours d'eau se complique davantage lorsqu'on tient compte de l'activité humaine. Les interventions humaines – modifications dans l'aménagement du territoire, utilisations qui consomment la ressource, construction d'ouvrages de dérivation, etc. – peuvent affecter la disponibilité de l'eau à l'échelle locale. Les efforts de modélisation exigent une connaissance des interventions locales (prélèvement aux fins d'irrigation, modifications dans l'aménagement du territoire, etc.). Comprendre les changements et la variabilité climatiques dans le large contexte canadien exige non seulement une meilleure compréhension, mais aussi une capacité de modélisation reposant sur une connaissance des processus hydrologiques et reflétant fidèlement l'activité humaine. Séparer l'incidence de l'activité humaine de l'effet des changements et de la variabilité climatiques est une étape fondamentale qui nous permettra ensuite d'évaluer et de prévoir la disponibilité de l'eau dans les circonstances diverses et changeantes propres au Canada.

La modélisation de la disponibilité de l'eau exige des données hydrologiques adéquates. Le Canada possède actuellement des réseaux de faible densité, et ses régions peu densément peuplées comptent encore moins de stations hydrologiques. Actuellement, nos capacités d'analyse et de modélisation sont biaisées en raison du manque de données sur l'écoulement des cours d'eau arrosant de petits bassins versants et le manque de liens entre les divers réseaux d'observation hydrologique (réseaux d'observation de l'écoulement des cours d'eau, des précipitations, de l'humidité, de l'évaporation, etc.). Le manque de données d'entrée de haute résolution et de grande précision limite notre capacité de modéliser la réponse des zones de captage. Essentiellement, on manque de connaissances détaillées sur les distributions spatiale et temporelle des précipitations, situation qui est principalement attribuable à la très faible densité de notre réseau d'observation du climat dans plusieurs régions du Canada et à notre incapacité de traduire les données de télédétection en valeurs hydrologiques significatives. Cette constatation est également valable pour un certain nombre d'autres paramètres essentiels (p. ex., le pergélisol, l'humidité des sols et le rayonnement).

De façon générale, nous commençons à examiner certaines questions fondamentales et à accomplir des pro-

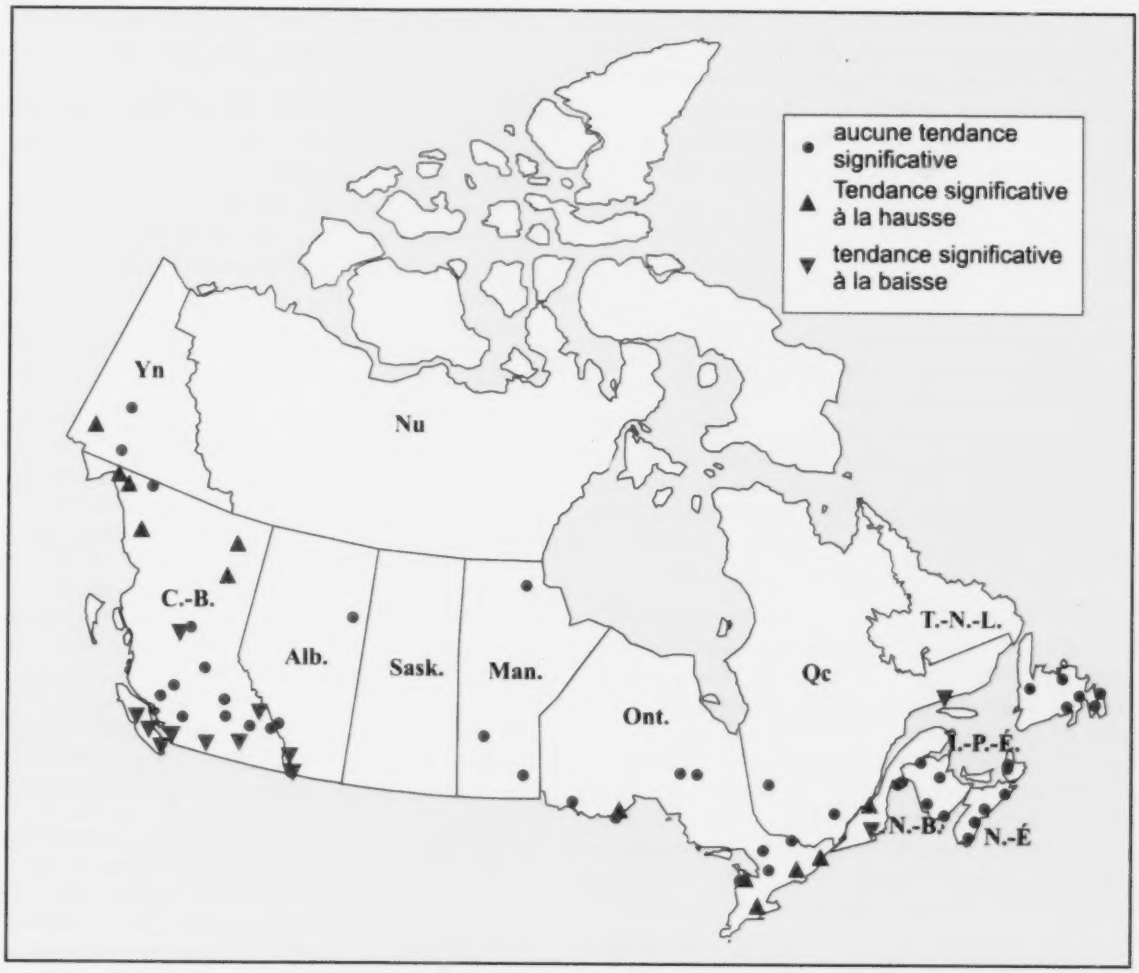


Figure 1. Tendances des données sur le débit journalier minimum annuel (1957-1996) recueillies pour le Réseau hydrométrique de référence du Canada (Yue et al., 2003).

grès vers l'amélioration de notre base de connaissances sur la disponibilité de l'eau. Cependant, les chercheurs canadiens ne mènent pas de recherches visant expressément à parfaire notre compréhension de la disponibilité de l'eau. Il existe certains secteurs pour lesquels le Canada fait preuve d'une très bonne connaissance des processus importants, mais d'autres secteurs souffrent de lacunes majeures sur les plans de la connaissance, de l'information et de l'interprétation. Le Canada a besoin d'un programme national dont le mandat serait de coordonner l'expertise scientifique, la collecte de données, la modélisation et la recherche. Nous serions ainsi mieux placés pour estimer la disponibilité de l'eau et réagir aux effets des changements et de la variabilité climatiques sur l'écoulement des cours d'eau.

Tendances

Le grand public devient sensibilisé à la question des changements et de la variabilité climatiques et à leur éventuelle incidence sur la disponibilité de l'eau. Une telle sensibilisation se traduit par une plus grande acceptation de la nécessité de pousser les recherches dans ce domaine et pourrait conduire à des actions visant à aborder les répercussions perçues.

On s'inquiète de plus en plus de l'incidence que pourraient avoir les changements et la variabilité climatiques sur les conditions hydrologiques extrêmes (c.-à-d. les inondations et les sécheresses) et sur les réserves globales d'eau disponibles. Les gens sont donc plus conscients de l'importance que revêt la compréhension de ces conditions extrêmes et de leurs effets possibles sur la société, l'économie et l'environnement.

Nous ne connaissons pas encore avec certitude l'incidence des changements et de la variabilité climatiques sur les plans d'eau qui sont importants pour les Canadiens. Nous consentons des efforts afin de définir d'éventuelles répercussions en se basant sur des scénarios qui sont souvent produits à partir des sorties d'un ou de quelques modèles de circulation générale. Or,

habituellement, les conditions prévues diffèrent selon le modèle employé. Et, curieusement, les répercussions prévues par les modèles (analyses pronostiques) ne sont généralement pas conformes à celles prévues par les analyses rétrospectives de données hydrologiques (analyses diagnostiques) réalisées pour les mêmes périodes. Par exemple, l'Étude d'impact sur le bassin de Mackenzie (Cohen, 1998) indique que le débit des tributaires du Mackenzie diminuera en raison du réchauffement, tandis que Whitfield et Cannon (2000) laissent entendre que le débit pourrait initialement augmenter dans ces mêmes cours d'eau. Il y a aussi des signes de concordance entre les analyses pronostiques et les analyses diagnostiques, notamment à savoir que la crue nivale se produit plus tôt qu'avant dans les bassins versants alimentés par la fonte des neiges. Mais aussi longtemps qu'un écart existe entre les résultats des analyses pronostiques et diagnostiques, il faudra faire preuve de prudence dans l'élaboration de stratégies et de politiques d'adaptation basées sur des informations apparemment conflictuelles.

Les études diagnostiques exigent des méthodes d'analyse basées sur des tests statistiques. On constate une tendance vers l'élaboration de méthodes de plus en plus complexes qui atténuent davantage les limites des approches antérieures et permettent l'établissement d'inférences spatiales. Ces approches ont mené à une plus grande compréhension des comportements et des tendances caractérisant l'écoulement des eaux (Burn et Hag Elnur, 2002; Cunderlik et Burn, 2002; Whitfield et Cannon, 2000; Yue et al., 2002b).

On constate cependant que divers réseaux hydrologiques comptent moins de sites disponibles pour des études diagnostiques. Les études diagnostiques basées sur des tests statistiques exigent des réseaux comportant des stations d'observation à long terme ayant une couverture géographique adéquate et qui permettent de déterminer si une tendance se maintient, ne se maintient pas ou devrait se maintenir et à quel endroit (Yue et al., 200a). On a besoin de données à long terme pour décrire les caractéristiques des changements climatiques et de la variabilité naturelle du climat et pour les distinguer les unes des autres.

Il est de plus en plus nécessaire que nous disposions d'une perspective plus globale des facteurs à l'origine de l'écoulement des cours d'eau. Nous comprenons mieux les liens qui existent entre les processus océaniques et atmosphériques à grande échelle et les processus météorologiques et hydrologiques. Parmi les processus océaniques et atmosphériques à grande échelle qui entrent en jeu, citons le phénomène El Niño -oscillation australe (ENSO) et l'Oscillation décennale du Pacifique (PDO). Nous avons une meilleure compréhension de ces processus et des répercussions qu'ils peuvent avoir sur l'hydrologie et, par conséquent, sur la disponibilité de l'eau, car de nouvelles recherches portent sur les relations en cause (Barlow et al., 2001; Neal et al., 2002).

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Il n'est pas facile d'établir une distinction entre la variabilité naturelle du climat et les changements climatiques à long terme. Pour approfondir cette question, il faut se concentrer sur les trois grands aspects suivants : collecte de données, mise au point de techniques, coordination et financement des programmes.

Collecte de données

Les réseaux canadiens de surveillance des eaux de surface et des précipitations sont mal financés, mal conçus et mal coordonnés. Par exemple, l'Organisation météorologique mondiale (1994) recommande une densité minimale pour les différents réseaux. En ce qui a trait aux sites de mesure des précipitations, le nombre recommandé est de 1 000 à 4 000 selon l'étendue du territoire à couvrir. Or, le Canada en possède moins de 500 (Organisation météorologique mondiale, 1995). Ces lacunes devraient être comblées pour un certain nombre de raisons, y compris la nécessité de fournir des assises solides aux études visant à établir une distinction entre les effets des changements climatiques et ceux de la variabilité naturelle du climat. Il faudra :

- Améliorer les liens entre les réseaux d'observation afin que l'on puisse mieux comprendre les causes et les effets des répercussions sur le cycle hydrologique. Par exemple, le bilan massique des glaciers offre la possibilité d'augmenter la connaissance hydrologique des changements transitoires affectant le régime de ruissellement (Moore et Demuth, 2001).
- Mener un examen approfondi de nos réseaux d'observation pour faire en sorte qu'ils soient efficaces et permettent de fournir des données adéquates à l'appui des analyses. Lorsque nos réseaux d'observation à long terme recevront un financement additionnel, le Canada aura les données et les connaissances requises pour la prise de décisions judicieuses.
- Recueillir des données sur l'écoulement et des données connexes à des sites additionnels situés dans des bassins hydrographiques sans régulation et qui ont conservé essentiellement leur état d'origine afin que l'on puisse combler les trouées géographiques et représenter de manière plus adéquate les plus petits bassins. Améliorer les observations faites dans de petits bassins augmentera les connaissances quant à l'effet des dimensions sur les processus hydrologiques au Canada.
- Augmenter les activités de collecte de données dans le nord du Canada où l'on prévoit que les changements climatiques à l'échelle locale seront plus importants que dans le Sud. Nous pourrons ainsi mieux vérifier que les changements se produisent comme prévu.

Mise au point de techniques

Le dilemme auquel le Canada est confronté en ce qui concerne les changements et la variabilité climatiques ainsi que leurs répercussions connexes montre combien il est nécessaire d'élaborer de nouvelles approches et méthodologies. Les approches courantes ne tiennent pas compte des ramifications sans précédent qui sont associées aux changements prévus. On s'est beaucoup fié à des méthodes d'analyse statistique peu complexes et aux modèles de circulation générale. Actuellement, peu de recherches sont menées sur les aspects hydrologiques des changements climatiques ainsi que sur l'élaboration de méthodes statistiques pour la détermination des tendances et applicables aux analyses hydrologiques. Il faudra :

- Élaborer des méthodes d'analyse statistique pour pouvoir comparer les résultats spatiaux et temporels générés par les modèles aux tendances spatiales et temporelles observées.
- Mettre au point des procédures rétrospectives (diagnostiques) plus poussées.

Il faudra également mettre au point des techniques d'analyse et de modélisation pour mieux comprendre les répercussions des changements climatiques, de la variabilité naturelle du climat et des interventions humaines. À cette fin, non seulement sera-t-il nécessaire d'élaborer de nouvelles approches de modélisation, mais il faudra également recueillir des données sur les utilisations qui consomment de l'eau, les ouvrages de dérivation, la régulation et les modifications dans l'aménagement du territoire. Les données de télédétection offrent une capacité inouïe d'évaluation de la disponibilité de l'eau au Canada, mais des investissements sont nécessaires pour que l'on puisse élaborer les méthodes nécessaires et profiter de ce potentiel. L'acquisition des capacités mentionnées ci-dessus est essentielle, car elles nous permettront de déterminer quelles sont et quelles seront les quantités d'eau disponibles pour l'ensemble du Canada. Ces concepts sont des composantes clés de la gestion intégrée des bassins hydrographiques et peuvent conduire à la mise en œuvre de pratiques d'adaptation qui aideront les Canadiens à faire face aux changements qui affectent la disponibilité de l'eau.

La détermination de tendances et de conditions locales passe par la réalisation d'analyses nationales, régionales (hémisphère, Amérique du Nord, etc.) et mondiales. Des schémas émergent et se dévoilent lorsque cette question est examinée selon différentes échelles et perspectives. Les pays devraient établir des réseaux spécialisés présentant des caractéristiques semblables à celles employées pour établir le Réseau hydrométriques de référence. Ces réseaux fourniraient une base commune pour l'analyse, l'évaluation et la compréhension des changements et de la variabilité climatiques dans les contextes mondial, régional et canadien.

Actuellement, les hydrologistes s'inquiètent de ce que les modèles de circulation générale ne donnent pas une idée exacte des conditions hydriques. Ces modèles ne fournissent pas de sorties aux échelles spatiales et temporelles, considérées comme essentielles pour les applications relatives aux ressources en eau. Il faudra :

- Améliorer la modélisation opérationnelle des systèmes hydrologiques canadiens en mettant surtout l'accent sur les rétroactions inhérentes à cette méthode.
- Améliorer les modèles opérationnels applicables aux bassins hydrographiques en leur intégrant des connaissances sur les processus hydrologiques de petite échelle afin que l'on puisse simuler plus fidèlement les processus naturels.
- Ne plus employer les sorties des modèles de circulation générale comme données d'entrée des modèles hydrologiques, car cela simplifie exagérément le cycle hydrologique et les rétroactions complexes que comportent les cycles de l'eau et de l'énergie.
- Déterminer le rendement des modèles de circulation générale et des modèles hydrologiques utilisant les données produites par les modèles de circulation générale pour des conditions connues, surtout en ce qui concerne la simulation des tendances qui ont caractérisé l'écoulement des cours d'eau au cours des 30 à 50 dernières années, pour qu'on puisse accroître la crédibilité des modèles en comblant l'écart entre les analyses pronostiques et les analyses diagnostiques.
- Augmenter la résolution des modèles de circulation générale afin que des caractéristiques terrestres importantes qui sont connues pour leur incidence sur le climat local, telles que les Grands Lacs et les montagnes Rocheuses, soient raisonnablement représentées dans le système de modélisation.

Les approches employées antérieurement pour évaluer les risques associés aux systèmes hydrologiques supposent, de manière explicite, que le régime hydrique est stationnaire et le demeurera dans le futur. Cette hypothèse n'est pas nécessairement valable compte tenu de la variabilité naturelle du climat et des changements climatiques. Toutefois, on ne possède pas suffisamment de preuves, en particulier en raison d'un manque de données sur lesquelles s'appuyer pour évaluer la variabilité et les changements climatiques et, dans une perspective de cause à effet, pour justifier un réexamen des approches de conception actuelles. Pour être prudent, il serait sage d'intégrer à la gestion des risques l'idée que les risques futurs peuvent être plus ou moins importants que ceux prévus en se basant sur une analyse historique des données. Actuellement, il est difficile de déterminer avec certitude si les comportements et les tendances récemment observées persisteront.

Coordination et financement des programmes

Il importe d'accroître le financement actuellement accordé aux activités de recherche et de développement portant sur l'eau disponible dans les cours d'eau du Canada et sur l'incidence des changements et de la variabilité climatiques sur nos ressources en eaux. Environnement Canada devrait faire converger et coordonner ses programmes sur l'eau et fournir également une orientation claire visant la compréhension des différents aspects reliés à la disponibilité de l'eau au Canada.

Les activités de recherche et de développement portant sur la disponibilité de l'eau sont fondamentales, car elles permettront l'élaboration de politiques et de programmes qui aideront les Canadiens et l'économie canadienne à cet égard. Les éventuelles répercussions des changements et de la variabilité climatiques sur la disponibilité de l'eau pourraient avoir d'énormes effets sur la société, l'économie et l'environnement. Pour éviter que les Canadiens ne soient exposés par inadvertance à un risque accru, il faut investir davantage dans les études menées pour déterminer la disponibilité de l'eau. Il faudra qu'un leadership soit exercé pour s'assurer que les efforts se concentrent sur des activités de recherche et de développement visant à améliorer la compréhension des conditions hydrologiques associées, d'une part, à la variabilité naturelle du climat et, d'autre part, aux changements climatiques. L'accent devrait être mis sur l'intégration de systèmes prévisionnels (diagnostiques et pronostiques) à la conception globale des infrastructures. On pourra ainsi mieux prévenir les pertes de vie, les dommages à la propriété et les pertes de revenus attribuables aux inondations et aux sécheresses.

Il faudrait mettre davantage l'accent sur l'analyse diagnostique rétrospective et continuer de concentrer les efforts sur la production de scénarios et la prévision de leurs répercussions. Il faudrait aussi élaborer des méthodes poussées d'analyse statistique spatiales et temporelles de même que valider les résultats produits par les modèles de circulation générale au moyen de données historiques et en faisant appel à des méthodes de traitement statistique éprouvées. Il est nécessaire d'améliorer la compréhension des rapports de cause à effet qui ont produit des comportements et tendances hydrologiques marqués aux cours des périodes récentes. Tous ces besoins soulignent la nécessité d'une plus grande coordination des programmes et d'un financement accru des programmes de recherche et de développement. Enfin, il importe que nous concentrions les efforts de collecte de données vers les stations hydrométriques situées sur des bassins naturels et que nous fassions une meilleure observation des variables météorologiques. Nous pourrons ainsi améliorer nos connaissances et nos capacités de modélisation hydrologiques, ce qui est crucial pour déterminer de façon quantitative les répercussions du climat sur la disponibilité de l'eau.

Références

Adamowski, K. et C. Bocci. 2001. « Geostatistical regional trend detection in river flow data ». Hydrolog. Processes 15: 3331-3341.

Barlow, M., S. Nigam et E.H. Berbery. 2001. « ENSO, Pacific decadal variability, and U.S. summertime precipitation, drought, and stream flow ». J. Climate 14: 2105-2127.

Burn, D.H. et M.A. Hag Elnur. 2002. « Detection of hydrologic trend and variability ». J. Hydrol. 255: 107-122.

Buttle, J.M., G. Jones, P. Marsh et M.K. Woo. 2000. « Recent advances in Canadian hydrology ». Hydrolog. Processes 14: 1537-1538.

Cohen, S. 1998. « Mackenzie basin impact study (MBIS) ». Environnement Canada, No. En 50-118/1997-1E, 1998. (Sommaire en français)

Cunderlik, J.M. et D.H. Burn. 2002. « Local and regional trends in monthly maximum flows in southern British Columbia ». Can. Water Resour. J. 27: 191-212.

Harvey, K.D., P.J. Pilon et T.R. Yuzyk. 1999. « Canada's reference hydrometric basin network (RHBN) ». *Dans* « Proceedings of the CWRA 51st Annual Conference, Nova Scotia ».

Kite, G.W. 1995. « The SLURP model, computer models of watershed hydrology », chapitre 15. *Dans* V.P. Singh (s. la dir. de), « Water Resources Publications », Littleton, Colo.

Kouwen, N. et S.-F. Mousavi. 2002. « WATFLOOD/SPL9 hydrological model and flood forecasting system », chapitre 15, p. 649-686. *Dans* V.P. Singh et D.K. Frevert (s. la dir. de), « Mathematical models of large watershed hydrology ». Water Resources Publications, Littleton, Colo.

Lins, H.F. et J.R. Slack. 1999. « Streamflow trends in the United States ». Geophys. Res. Lett. 26(2): 227-230.

Moore, R.D. et M.N. Demuth. 2001. « Mass balance and streamflow variability at Place Glacier, Canada, in relation to recent climatic fluctuations ». Hydrolog. Processes 15: 3473-3486.

Neal, E.G., M.T. Walter et C. Coffeen. 2002. « Linking the pacific decadal oscillation to seasonal discharge patterns in Southeast Alaska ». J. Hydrol. 263: 188-197.

Organisation météorologique mondiale (OMM). 1994. Guide des pratiques hydrologiques : acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications. 5e édition. OMM no 168. Tableau 20.1 (densités minimales recommandées des stations pluviométriques), p. 286.

Organisation météorologique mondiale (OMM). 1995. « INFOHYDRO manual ». WMO no 683. Table 4.4.07.

Pilon, P.J. et J.K. Kuylenstierna. 2000. Les bassins fluviaux et les indices hydrologiques, éléments clés des études sur les changements climatiques. Bulletin de l'OMM 49(3): 270-277.

Pilon, P.J. et S. Yue. 2002. « Detecting climate-related trends in streamflow data ». Water Sci. Technol. 8(45): 89-104.

Whitfield, P.H. et A.J. Cannon. 2000. « Recent variation in climate and hydrology in Canada ». Can. Water Resour. J. 25: 19-65.

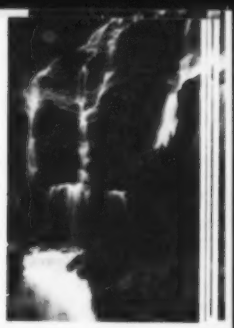
Yue, S., P.J. Pilon, G. Cavadias et B. Phinney. 2002a.

« Power of the Mann-Kendal and Spearmans rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series ». J. Hydrol. 259: 254-271.

Yue, S., P.J. Pilon et B. Phinney. 2003. « Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross correlation ». J. Hydrol. Sci. 48(1): 51-64.

Yue, S., P.J. Pilon, B. Phinney et G. Cavadias. 2002b. « The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series ». Hydrolog. Process. 16(9): 1807-1829.

Zhang, X., K.D. Harvey, W.D. Hogg et T.R. Yuzyk. 2001. « Trends in Canadian streamflow ». Water Resour. Res. 37(4): 987-998.



Chapitre 12

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – LACS ET RÉSERVOIRS

William M. Schertzer[1], Wayne R. Rouse[2], David C.L. Lam[1], Derek Bonin[3] et Linda D. Mortsch[4]

[1] Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington (Ont.)

[2] Université McMaster, École de géographie et de géologie, Hamilton (Ont.)

[3] District régional de Vancouver, Vancouver (C.-B.)

[4] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Downsview (Ont.)

Situation actuelle

On définit généralement un lac comme un plan d'eau douce ou salée intérieur de dimensions appréciables (c.-à-d., plus grand qu'un étang), trop profond pour permettre à la végétation (à l'exception de la végétation submergée) de s'enraciner complètement dans toute son étendue. On estime que le Canada compte plus d'un million de lacs, qui couvrent 7,6 % du territoire. Presque 14 % de tous lacs de la planète dont la superficie dépasse 500 km^2 sont situés au Canada, qui compte aussi 578 lacs mesurant plus de 100 km^2 (Comité national canadien, 1975). Des quantités d'eau considérables (qui n'ont pas été mesurées avec précision) sont contenues dans de petits et de moyens lacs de même que dans plus de 900 réservoirs importants (voir le chapitre 2). Le Canada compte un vaste éventail de types de lacs qui sont répartis dans cinq bassins hydrographiques principaux (figure 1). Parmi ces lacs, mentionnons les grands lacs de la région laurentienne et ceux de la région du Mackenzie, les lacs arctiques et subarctiques, les lacs et réservoirs glaciaires, boréaux, perchés, des Prairies ainsi que les lacs et réservoirs salés intérieurs peu profonds. À l'exception de certains lacs de grandes ou de plus petites dimensions, on ne possède pas beaucoup de connaissances de base sur la morphologie et les réactions hydrologiques des lacs du Canada, particulièrement dans les vastes régions nordiques. On estime que le Canada possède environ 20 % des réserves d'eau douce actuelles de la planète. Néanmoins, en raison d'incertitudes et de l'absence d'un inventaire régional détaillé des lacs, il est difficile d'évaluer avec précision la disponibilité de ressources en eau douce non contaminée. Or, de tels renseignements sont essentiels, puisque la compréhension des nombreux facteurs influant sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes est souvent reliée aux approvisionnements en eau douce.

Les lacs et les réservoirs sont des sources d'eau importantes pour une foule d'usages socio-économiques, tels que l'approvisionnement des municipalités, l'irrigation, les procédés industriels et les activités récréatives. La demande d'eau douce non polluée augmentera certainement à mesure que la population du Canada s'accroîtra; par conséquent, l'incidence de la variabilité et du réchauffement climatiques sur la disponibilité de l'eau douce non contaminée provenant des lacs et des réservoirs constitue une question cruciale. Le présent chapitre donne une vue d'ensemble des importants facteurs de perturbation qui influent sur l'approvisionnement en eau douce au Canada et de la vulnérabilité découlant de ces facteurs; on trouve aussi dans ce chapitre une évaluation de la réaction des lacs et des réservoirs à la variabilité et au réchauffement climatiques, illustrée à l'aide d'exemples précis de types de lacs et de réservoirs situés dans différentes régions du Canada.

Facteurs de perturbation et vulnérabilité actuels des lacs et des réservoirs

Les ressources en eau emmagasinées dans les lacs et les réservoirs du Canada deviennent de plus en plus vulnérables à de nombreux facteurs de perturbation d'origine naturelle et humaine (Bruce et al., 2000). Par exemple, parmi les facteurs de perturbation naturels, on trouve une variabilité et des extrêmes climatiques accrus qui peuvent avoir une incidence sur l'ampleur des composantes du bilan hydrique qui influent sur la disponibilité de ressources en eau douce non contaminée ainsi que sur leurs cycles saisonniers. On a démontré que les extrêmes climatiques (p. ex., le phénomène El Niño et les systèmes météorologiques de grande échelle qui provoquent des vents forts et des précipitations abondantes) avaient une incidence significative sur le stockage thermique, la température et l'évaporation dans les lacs (Rouse et al., 2003; Schertzer et al., 2000).

Les facteurs de perturbation d'origine humaine, tels que l'augmentation d'utilisations consommant de l'eau, sont souvent reliés aux régions qui présentent une croissance démographique significative. Ces facteurs de perturbation provoquent l'abaissement des niveaux des lacs et la réduction des débits en aval, un sujet de préoccupation important en raison de l'incidence négative de l'abaissement progressif des niveaux de l'eau sur l'é-

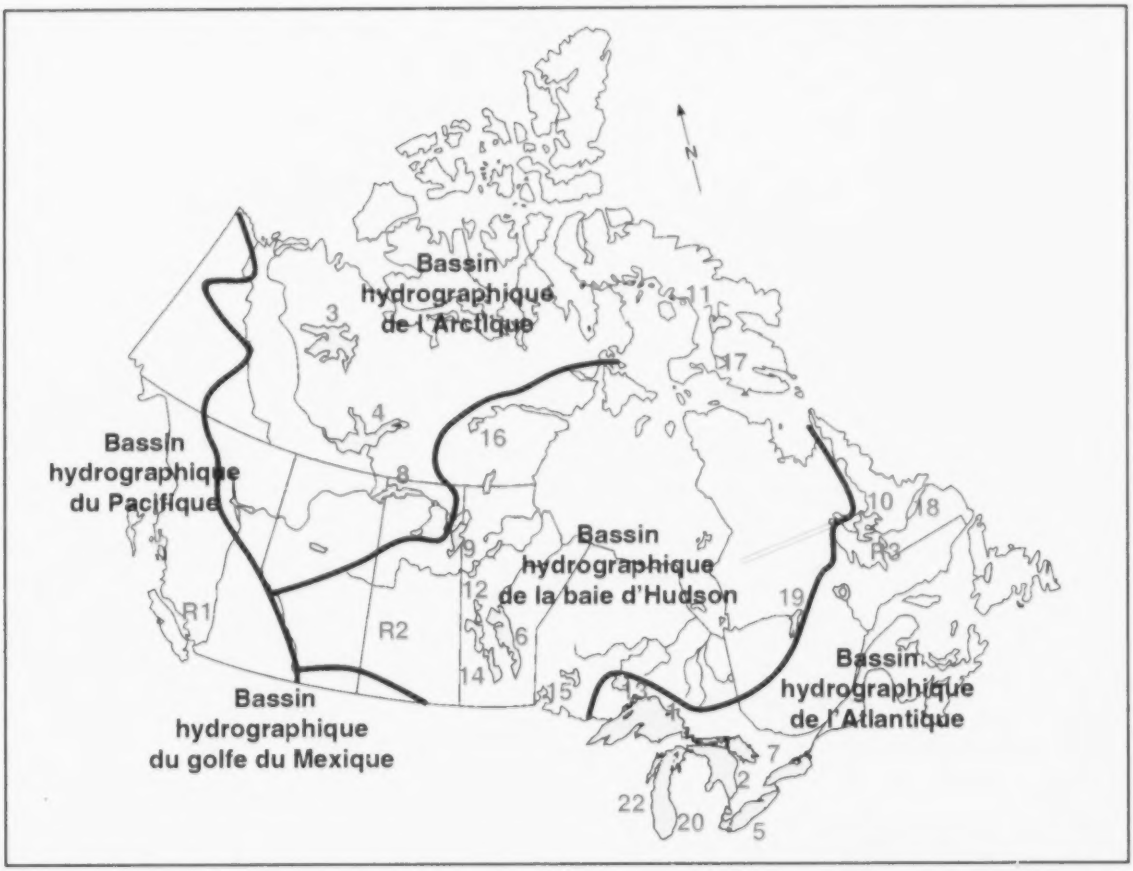


Figure 1. Emplacement des principaux bassins hydrographiques, distribution des 20 plus grands lacs (> 1 000 km^2) au Canada et emplacement des réservoirs choisis.

Lacs			
1. Supérieur	2. Huron	3. Great Bear	4. Grand lac des
5. Érié	6. Winnipeg	7. Ontario	8. Athabasca
9. Reindeer	10. Smallwood	11. Nettling	12. Winnipegosis
13. Nipigon	14. Manitoba	15. Lac des Bois	16. Dubawnt
17. Amadjuak	18. Melville	19. Mistassini	20. Sainte-Claire
22. Michigan (entièrement aux États-Unis)			

Réservoirs		
R1. Vancouver	R2. Lac Diefenbaker	R3. Churchill Falls

conomie et l'environnement. Actuellement, la consommation d'eau totale par habitant au Canada est d'environ 350 litres par jour.

La dérivation de l'eau entre bassins influe aussi sur les débits dans chaque bassin. Ainsi, il existe actuellement cinq principaux ouvrages de dérivation de l'eau dans la région laurentienne des Grands Lacs (c.-à-d., ceux de Long Lac, d'Ogoki et de Chicago, le canal Welland et le Barge Canal de l'État de New York) ainsi que deux ouvrages de régulation (Sault Ste. Marie et Cornwall) (figure 2). Ces ouvrages ont une incidence à long terme sur les niveaux d'eau des Grands Lacs et, dans certains cas, influent sur la dilution des polluants.

Dans le passé, des changements importants sont survenus en ce qui a trait aux niveaux d'eau des Grands Lacs à cause de la variabilité climatique (figure 3). Les

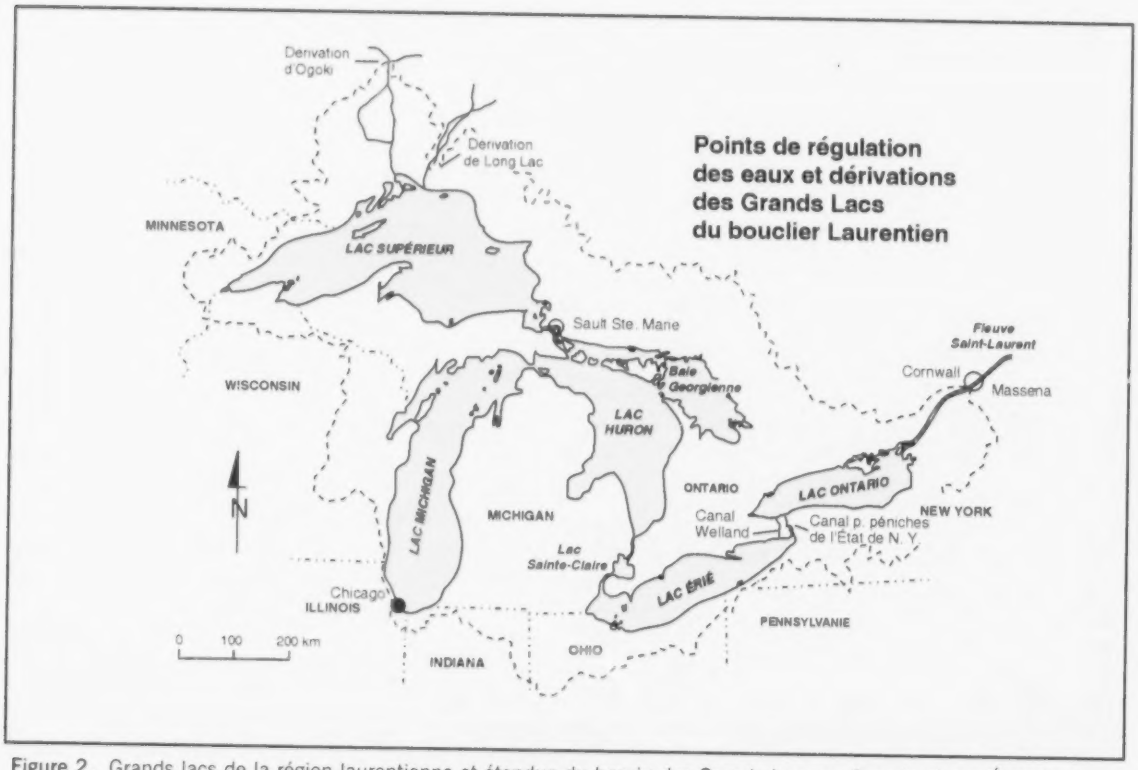


Figure 2. Grands lacs de la région laurentienne et étendue du bassin des Grands Lacs au Canada et aux États-Unis. Les ouvrages de régulation de l'eau sont indiqués à Sault Ste. Marie et à Cornwall. Les ouvrages de dérivation de l'eau sont situés à Ogoki, à Long Lac, à Chicago, au canal Welland et au canal Barge, dans l'État de New-York.

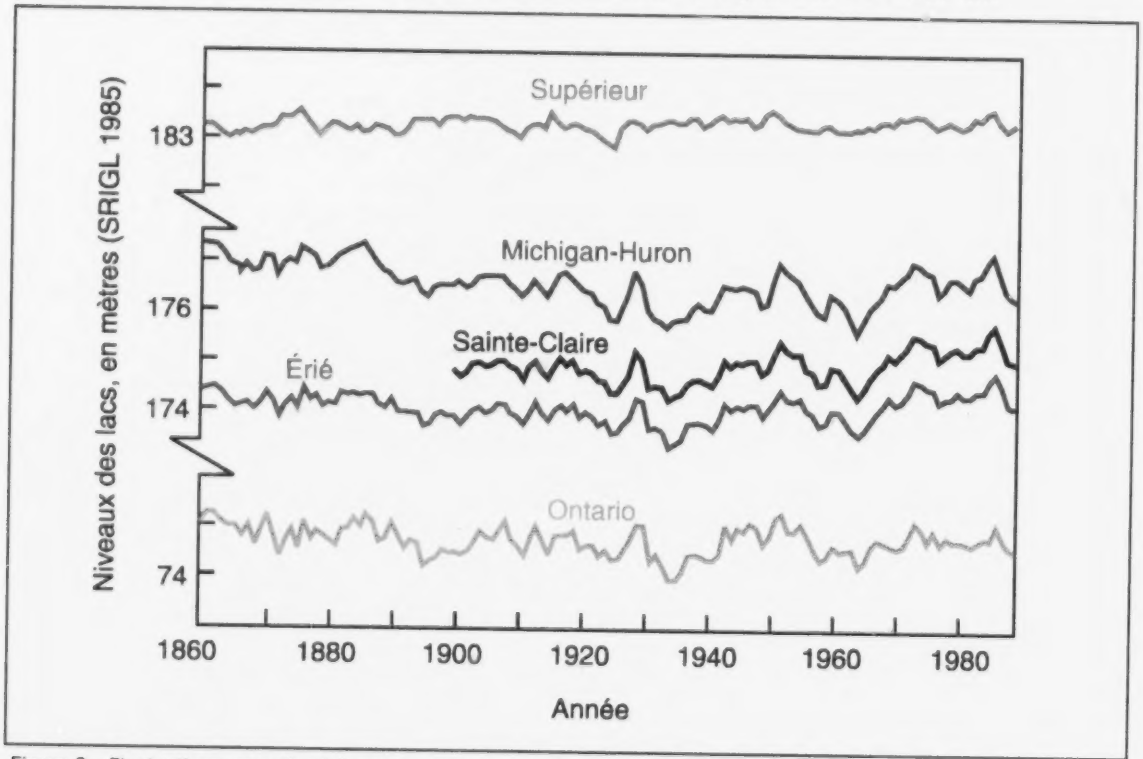


Figure 3. Fluctuations annuelles à long terme du niveau d'eau des grands lacs de la région laurentienne de 1960 à 1990, en fonction du système de référence international des Grands Lacs (SRIGL) de 1985 (d'après Croley, 1995).

niveaux d'eau élevés et bas ont tous deux entraîné des problèmes. Les niveaux élevés ont causé l'érosion des berges, ce qui a engendré des coûts économiques et des coûts d'infrastructure considérables pour le remplacement et l'entretien des propriétés riveraines ainsi que la protection du littoral. Les bas niveaux ont une incidence sur la navigation, les activités récréatives, la production d'hydroélectricité, les écosystèmes et la santé. La faible profondeur de l'eau compromet la navigation dans les voies interlacustres. Il a fallu procéder au dragage de la rivière St. Mary, du lac Sainte-Claire et d'autres cours d'eau pour maintenir la profondeur des chenaux.

L'exportation de l'eau est un enjeu susceptible d'avoir une incidence sur la disponibilité de l'eau. Le Canada vend de l'eau embouteillée à d'autres pays, mais l'exportation d'eau en vrac n'est pas permise actuellement.

Les réserves d'eau dans les réservoirs sont touchées à la fois par la variabilité du climat et les pressions de l'offre et de la demande. Il arrive souvent que des utilisations concurrentes aient une incidence sur les réserves d'eau douce des lacs (p. ex., l'augmentation des débits minimaux pour les activités récréatives et la préservation de l'habitat du poisson en aval). Les facteurs de perturbation sont souvent cumulatifs et constituent, par conséquent, des menaces grandissantes pour la disponibilité de l'eau. Parmi les autres facteurs de perturbation, on compte la modification des habitats et des bassins hydrographiques ainsi que les changements touchant l'aménagement du territoire. Le vandalisme et le terrorisme constituent des préoccupations permanentes en matière de sécurité qui peuvent compromettre la disponibilité des ressources en eau douce non contaminée. Le maintien de l'accès aux ressources en eau en vertu des accords commerciaux et des droits des peuples autochtones menace aussi la disponibilité de l'eau.

Les lacs du Canada, dont le nombre dépasse le million, sont importants pour l'irrigation, l'industrie, l'approvisionnement en eau des localités et les loisirs.

La vulnérabilité des lacs et des réservoirs aux perturbations varie. Par exemple, les préoccupations relatives aux grands lacs profonds diffèrent de celles concernant les lacs plus petits. Il existe un éventail de formes de gestion des lacs dans diverses régions du Canada. Dans les systèmes non gérés, il n'existe pas de structures pour atténuer les effets de la variabilité hydrologique sur l'approvisionnement en eau. Bien que les préoccupations relatives aux lacs diffèrent dans les diverses régions du Canada, les systèmes d'eau non gérés ainsi que les systèmes affectés actuellement par des facteurs de perturbation ou qui ne sont pas gérés de façon adéquate sont les plus vulnérables.

Tendances

Projections, effets et réactions en matière de changements climatiques

Les modèles de circulation générale permettent d'élaborer un large éventail de scénarios de changement climatique. Ces scénarios indiquent une tendance manifeste au réchauffement climatique. Cependant, les modèles ne concordent pas toujours quant à l'ampleur d'autres composantes ou à la tangente prise par celles-ci, notamment les précipitations. Actuellement, il existe une incertitude quant aux impacts sur les lacs qui résulte d'un couplage inadéquat entre les processus atmosphériques et lacustres. Tous les lacs et réservoirs du Canada seront touchés par les changements climatiques. Les pages qui suivent donnent des exemples de réactions possibles à la variabilité et aux changements climatiques.

Réaction des grands lacs. Les grands lacs de la région laurentienne représentent une source d'eau douce pour 45 millions de personnes. Les préoccupations les concernant ont toujours porté principalement sur la quantité d'eau et la qualité de l'eau. Des recherches en cours devraient permettre de comprendre les effets potentiels de la variabilité et des changements climatiques sur ces lacs. Des analogues et des transpositions climatiques ainsi que des scénarios de changement climatique stationnaires ou transitoires basés sur des modèles de circulation générale (MCG) ont été appliqués (voir Schertzer et Croley, 1999). Le tableau 1 montre un exemple de résultat d'un scénario de changement climatique transitoire. D'après ce modèle, les conditions météorologiques dans les régions des lacs considérés favorisent l'augmentation de l'évaporation annuelle dans chacun d'eux. Selon les prévisions, l'apport d'eau net dans le bassin, qui se définit comme la somme des précipitations et du ruissellement moins l'évaporation, devrait connaître une augmentation dans le lac Supérieur. Cependant, on observe d'importantes diminutions d'un tel apport dans les lacs en aval, et la diminution dans le cas du lac Sainte-Claire est particulièrement notable. Dans tous les cas, cette simulation semble indiquer que le réchauffement climatique entraînerait une réduction des niveaux

Tableau 1. Exemple d'une simulation de scénario climatique transitoire pour certaines variables réalisée à l'aide du modèle du Goddard Institute for Space Studies pour évaluer les effets potentiels des changements climatiques sur les grands lacs de la région laurentienne (modification d'après Croley, 1995)

Variable hydrologique	Basin (mm/décennie)					
	Supérieur	Michigan	Huron	Sainte-Claire	Érié	Ontario
Précipitations annuelles dans le bassin	+24	+7	+2	-0	+3	+1
Évaporation annuelle dans le bassin	+25	+14	+12	+15	+16	+16
Ruissellement annuel dans le bassin	+4	-7	-9	-15	-15	-14
Évaporation annuelle dans le lac[a]	+18	+19	+22	+38	+40	+24
Apport d'eau net annuel dans le	+17	-27	-41	-245	-75	-75
Débit sortant net annuel[a]	+20	-31	-31	-241	-70	-57[b]
Niveau du lac	-13	-59	-59	-64	-66	-93[b]

[a]Apport d'eau net dans le bassin = précipitations + ruissellement - évaporation, exprimé en tant que hauteur d'eau dans le lac.
[b]Calculé pour les sept premières décennies, car le plan de régulation du lac Ontario n'a pas fonctionné au cours de la huitième décennie.

des lacs. D'autres simulations (p. ex., les MCG du Centre canadien de modélisation et d'analyse climatologiques et de Hadley) indiquent des augmentations et des diminutions des niveaux d'eau dans les Grands Lacs (Mortsch et al., 2000). Bien que certaines simulations indiquent des augmentations des niveaux des lacs, ces augmentations ne sont pas supérieures à celles qui résultent de la variabilité naturelle. Malgré l'incertitude mise au jour dans ces simulations, on s'entend généralement quant à la diminution probable des niveaux des lacs dans des conditions de réchauffement climatique. Cette situation est préoccupante, puisqu'on se demande si la quantité d'eau disponible dans les grands lacs de la région laurentienne sera suffisante pour répondre à l'augmentation prévue de la demande pour la navigation, la consommation, la dérivation et l'exportation.

Certaines des récentes augmentations de température les plus importantes au monde ont été enregistrées récemment dans le bassin du Mackenzie (Stewart et al., 1998). Tous les grands lacs de ce bassin sont encore dominés par les glaces au mois de juin et le sont souvent jusqu'au solstice d'été. Si la fonte des glaces est hâtive, une plus grande quantité d'énergie solaire réchauffe les lacs au printemps, ce qui occasionne un stockage thermique plus important (Schertzer et al., 2000). Cette énergie commence à retourner dans l'atmosphère au milieu et à la fin de l'été par l'évaporation et la convection. Les flux associés à la convection atteignent une pointe à l'automne ou au début de l'hiver, bien après que les surfaces terrestres et les lacs plus petits soient gelés. Le réchauffement climatique hâterait donc la fonte des glaces au printemps, conduirait à un réchauffement solaire plus important et à plus d'évaporation pouvant se poursuivre plus longtemps au cours de l'hiver suivant. Blanken et al., (2000) démontrent clairement que de tels changements peuvent se produire à l'intérieur d'une année.

La plupart des grands lacs du Canada font partie de très grands bassins hydrographiques susceptibles de subir les répercussions de phénomènes qui se produisent loin en amont, tels la régulation du débit (voir le chapitre 2). Par exemple, le lac Winnipeg est alimenté par la rivière Saskatchewan. Or, cette rivière présente sur presque tout son cours un bilan hydrique négatif pendant l'été, son débit étant soutenu par la fonte des neiges et des glaces dans les Rocheuses. En conséquence, le réchauffement climatique aura une incidence sur la fonte des neiges et des glaces dans les montagnes ainsi que sur la dynamique de l'apport d'eau dans le lac Winnipeg.

Réaction des plus petits lacs. Les cartes à plus grande échelle du Canada montrent des zones qui semblent dépourvues de lacs, mais l'ensemble du territoire canadien compte en fait un éventail de lacs et d'étangs plus petits (Allan et al., 1994). Nombre de ces lacs, notamment ceux du Nord, sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques. Les caractéristiques des réactions des plus petits lacs à la variabilité et aux changements climatiques sont présentées ci-dessous pour différents types de lacs.

Le bassin du fleuve Mackenzie comprend une myriade de lacs de toutes les tailles, particulièrement dans le Bouclier canadien. Les ratios annuels d'évaporation pour les terres, les petits lacs, les lacs de taille moyenne et les grands lacs s'établissent à environ 1, 1,28, 1,65 et 2,11 respectivement, ce qui indique que les lacs con-

stituent des systèmes d'évaporation très efficaces et que l'évaporation à partir d'un lac est proportionnelle à sa superficie (Rouse et al., 2002). L'évaporation à partir des petits lacs peut doubler par temps très chaud et très ensoleillé, et l'évaporation saisonnière du Grand lac des Esclaves peut augmenter de 28 % (Blanken et al., 2000) pendant les épisodes de chaleur intense causés par El Niño. On peut donc déduire que l'évaporation à partir des lacs de toutes tailles est extrêmement sensible au réchauffement climatique. Plus le lac est grand, plus l'évaporation se produira tard en saison. L'évaporation à partir d'un petit lac peu profond suit de près le rayonnement solaire et le cycle de la température de l'air, en atteignant une pointe au début du mois de juillet, alors que dans un lac profond, tel que le Grand lac des Esclaves, elle accuse un retard d'environ trois mois sur les petits lacs, avec une pointe à la fin de l'automne et au début de l'hiver. Malheureusement, le réchauffement climatique aurait un effet rétroactif incertain sur, par exemple, la nébulosité et la réception de l'énergie solaire à la surface de la Terre dans différentes régions du Canada.

Environ 60 % des 25 000 lacs présents dans le delta du Mackenzie sont perchés au-dessus du canal de distribution principal. Ces lacs présentent généralement un bilan hydrique négatif entre les inondations, qui sont de plus tributaires de la fréquence des précipitations (pluie et neige). La débâcle a pour effet de déverser des eaux de crue dans ces lacs au printemps. Ce phénomène se produit tous les cinq ans en moyenne; dans l'intervalle, de nombreux lacs s'assèchent. Le réchauffement climatique influera sur la dynamique de ces lacs. Marsh et Lesack (1996) ont démontré que le bilan hydrique était plus négatif dans le cas des scénarios avec doublement des concentrations de CO_2. Pour modéliser les variations des inondations causées par les embâcles, il faudrait être en mesure de simuler plus adéquatement le débit du Mackenzie et les cas d'embâcles.

Dans une étude sur les lacs boréaux du nord-ouest de l'Ontario, Schindler et al. (1996) ont démontré qu'entre les années 1970 et 1990, malgré une variabilité interannuelle considérable, il y a eu une augmentation de la température de l'air (+1,6 °C), une diminution générale des précipitations (~60 % par rapport aux années des précipitations les plus élevées), une augmentation de l'évaporation (~50 %) et une augmentation du rayonnement solaire annuel. L'effet net des variations des précipitations et de l'évaporation a été une diminution du débit des cours d'eau et une réduction considérable du ruissellement annuel, soit d'environ 400 à < 150 $mm.an^{-1}$ à la fin des années 1980. Les effets combinés ont occasionné une augmentation du temps de renouvellement de l'eau dans les lacs. La température des lacs a augmenté pendant cette période et les épilimnions sont devenus plus profonds alors que les thermoclines se sont abaissées d'environ 1,5 m. La saison inter-glacielle moyenne a aussi été prolongée d'environ 15 jours et la fonte des glaces s'est produite beaucoup plus tôt. Les changements sur le plan météorologique et hydrologique ont aussi eu incidence sur les transferts de substances chimiques des bassins vers les lacs, ce qui a par conséquent modifié les processus, les caractéristiques chimiques ainsi que les composantes biologiques des lacs.

Les effets des changements climatiques différeront pour certains types de lacs, notamment les lacs arctiques, subarctiques, boréaux et glaciaires, ainsi que pour les bourbiers des prairies. Avec le réchauffement climatique, les lacs arctiques et alpins élevés qui ne fondent pas complètement actuellement sont susceptibles de devenir totalement libres de glaces pendant l'été. Cette situation aura pour effet de modifier leur bilan hydrique annuel. L'accroissement du dégel du pergélisol peut rendre certains lacs nordiques vulnérables à un assèchement catastrophique par les canaux d'eau congelés actuels. Un climat plus chaud occasionnera une augmentation de la fonte et du ruissellement glaciaires, ce qui aura une incidence sur la dynamique du bilan hydrique des lacs glaciaires. Présentement, de nombreux bourbiers des prairies sont éphémères. Si, comme l'indiquent nombre de scénarios climatiques, la région des Prairies est touchée par des conditions de sécheresse accrue, un plus grand nombre de ces étangs deviendront éphémères et ceux qui présentent actuellement des signes de perturbation disparaîtront, réduisant la disponibilité de l'eau pour l'abreuvement du bétail et la préservation de l'habitat de la sauvagine. Les bassins hydrographiques alimentés principalement par les eaux de fonte subiront des variations quant à la fréquence et à l'importance des débits de pointe ainsi que des diminutions au chapitre des faibles débits, ce qui aura une incidence sur les niveaux d'eau des lacs. La variation de la profondeur de la nappe phréatique à la suite de changements hydrologiques peut avoir des effets sur les aquifères et les lacs alimentés par des eaux souterraines. Si la fréquence des pluies abondantes augmente, le ruissellement des petits bassins hydrographiques est susceptible de connaître des débits de pointe plus élevés. Cette situation peut constituer une menace pour l'intégrité des barrages et des réservoirs, car elle augmenterait l'érosion des berges, provoquerait le transport de charges solides vers les lacs et aurait des effets à court terme sur les niveaux d'eau des lacs.

Réaction des réservoirs. Le nombre de réservoirs est en constante augmentation au Canada (voir le chapitre 2). En général, ces sources d'eau douce alimentent les aqueducs municipaux ou servent pour l'agriculture et la production d'énergie dans les régions où il est impossible d'avoir accès à de grands lacs. La taille des réservoirs varie, et il peut s'agir de réseaux répartis sur plus d'un bassin hydrographique. La disponibilité de l'eau repose à la fois sur les gains et les pertes du réservoir même et de son bassin hydrographique. Les paragraphes qui

suivent donnent des exemples de réaction de ces réservoirs à la variabilité climatique ainsi que de réactions potentielles au réchauffement climatique. Parmi les exemples choisis, mentionnons le réservoir du Grand Vancouver (Colombie-Britannique), qui est un réseau traversant de multiples bassins hydrographiques; le réseau de barrages et de réservoirs du bassin de la rivière Grand (Ontario); le lac Diefenbaker (Saskatchewan), qui est un lac artificiel, et un réservoir de grandes dimensions, celui de Churchill Falls (Labrador), qui est utilisé pour la production hydroélectrique.

Le District régional de Vancouver assure un approvisionnement en eau à deux millions de personnes en puisant dans trois bassins hydrographiques forestiers situés dans les montagnes de la côte sud du Pacifique. La planification de l'approvisionnement en eau a été effectuée en fonction des registres climatiques des cent années précédentes, qui indiquent des précipitations hivernales considérables créant d'importantes accumulations de neige. Les réservoirs demeurent remplis pendant une bonne partie de l'été en raison du ruissellement des eaux de précipitations et de fonte. Après la fonte, les niveaux des réservoirs diminuent jusqu'à la fin de l'été, et ceux-ci sont remplis de nouveau par les orages d'automne. Selon les prévisions, les changements climatiques qui toucheront la région de la côte sud du Pacifique se traduiront par des orages de forte intensité ainsi que des températures annuelles plus élevées susceptibles d'entraîner une réduction des accumulations de neige, prolongeant de ce fait la période sèche de l'été. Ces changements auraient pour effet d'augmenter la demande en eau des consommateurs pendant une période estivale plus longue, et ce, au moment où les apports d'eau dans le réservoir sont inférieurs aux débits sortants destinés à la consommation et aux autres utilisations en aval, ce qui occasionnerait des niveaux d'eau extrêmement bas dans les réservoirs. Ce scénario indique que la disponibilité d'un approvisionnement fiable en eau pour la région de Vancouver est menacée et que, par conséquent, il faudrait peut-être imposer des mesures de conservation et des restrictions d'utilisation de l'eau additionnelles, agrandir les réservoirs et créer des sources d'approvisionnement supplémentaires. Les changements climatiques prévus créent des incertitudes quant à l'intégrité écologique des écosystèmes terrestres et aquatiques. Selon les scénarios de changement climatique, des tempêtes hivernales de forte intensité pourraient accroître la fréquence et l'ampleur des glissements de terrain. Des étés plus longs et plus secs pourraient aussi occasionner une augmentation de la fréquence et l'ampleur des incendies de forêt. De nouvelles espèces, notamment des insectes envahissants, sont susceptibles de compromettre la santé des forêts. Ces perturbations de l'écosystème entraînent la libération de sédiments et d'éléments nutritifs qui demeurent en suspension dans les eaux de ruissellement qui les entraînent jusqu'aux réservoirs. Or, une quantité accrue d'éléments nutritifs et de sédiments, conjuguée à de bas niveaux d'eau associés à un temps potentiellement anormalement chaud pour la saison, pourrait provoquer des changements sur le plan de l'écologie aquatique dans les réservoirs peu profonds, ce qui pourrait entraîner l'eutrophisation de l'eau et une dégradation inquiétante de la qualité de l'eau (Hamilton et al., 2001). Le système d'approvisionnement en eau est conçu selon des paramètres de qualité de l'eau historiques. Des changements significatifs de la qualité de l'eau d'une source sont susceptibles de rendre cette dernière inutilisable pendant une période donnée, augmentant ainsi la demande exercée sur d'autres réservoirs.

À l'origine, le réseau de barrages et de réservoirs de la rivière Grand a été conçu pour limiter les inondations au printemps; cependant, au fil des ans, on s'en est également servi pour accroître le débit pendant les périodes d'étiage, préserver les habitats et permettre un usage récréatif. Habituellement, lorsqu'on assure une régulation de printemps « normale », les réservoirs se remplissent avec la fonte des neiges et les précipitations qui surviennent dans le bassin hydrographique. Toutefois, ces dernières années, le manque de neige, les hivers doux et les épisodes de pluie en hiver ont réduit la couverture de neige et les crues au printemps. Les pratiques de gestion ont dû être modifiées, en partie à cause des nouvelles conditions climatiques – faible couverture de neige et fonte des neiges plus hâtive combinées à un temps chaud et sec en été, avec des demandes d'eau élevées et des pertes par évaporation. On a donc commencé à remplir les réservoirs plus tôt le printemps en stockant l'eau des fontes hâtives en prévision des faibles débits de l'été et de l'automne. Toutefois, en procédant de la sorte, on rend le réseau plus vulnérable aux inondations si des chutes de neige printanières ou des épisodes de précipitations tardifs se produisent et que les réservoirs sont presque pleins. En acceptant ce risque, on peut par contre accroître les faibles débits de l'été grâce à l'eau stockée et ainsi maintenir les habitats des poissons de pêche, la capacité d'assimilation, les activités récréatives et l'esthétique des lieux.

Le lac Diefenbaker est un réservoir du centre de la Saskatchewan dont le bilan hydrique est négatif et qui est alimenté par la rivière Saskatchewan Sud. Pendant les années de sécheresse, l'apport d'eau est restreint et l'évaporation est accrue, ce qui provoque la baisse des niveaux. La consommation d'eau (p. ex., irrigation et abreuvement du bétail), lorsque conjuguée à l'action de multiples facteurs de perturbation par temps sec, vient aggraver le problème. Or, le réchauffement climatique pourrait augmenter l'évaporation dans le réservoir et son bassin hydrographique. Dès lors, si aucune précipitation ne vient compenser les pertes, les ressources en eau risquent d'être gravement touchées.

Le réservoir Smallwood, au Labrador, est le plus grand du Canada. Il fournit de l'eau à la centrale hydroélectrique de Churchill Falls, dont la production couvre 20 % des besoins totaux du Québec. Ce réservoir a une superficie de 5698 km^2 et peut contenir 29 x 10^9 m^3 d'eau. Il a submergé des zones de marais et de muskeg, et son bassin hydrographique inclut une bonne partie de l'ouest et du centre du Labrador. Sur une base annuelle, le bassin hydrographique reçoit en moyenne 765 mm de précipitations. Un changement à long terme de l'importance et du moment des chutes de pluie et de neige dans le bassin affecterait la capacité globale de production d'électricité. Cependant, les producteurs d'électricité peuvent ajuster leurs pratiques opérationnelles pour s'adapter à de tels changements. Avec les changements climatiques, certaines simulations indiquent que le fleuve Churchill affichera un débit printanier plus élevé et un débit estival moins élevé si des changements surviennent dans l'hydrologie du bassin. Parmi les conséquences que pourraient avoir de tels changements, mentionnons des problèmes de capacité des turbines pendant les débits de pointe du début du printemps et une capacité hydroélectrique moindre en été, période où la demande du marché est la plus grande.

Effets sur les processus lacustres et les cycles saisonniers

La disponibilité d'eau douce non contaminée dans les lacs et les réservoirs est fonction de processus hydrodynamiques et thermodynamiques (Schertzer, 1997). Des processus tels que la stratification thermique, les mouvements de l'eau et la couverture de glace varient selon la température et sont en grande partie associés à la redistribution de l'eau dans le lac (Lam et Schertzer, 1999). Ce sont toutefois les régimes thermiques des lacs qui sont les plus affectés par la variabilité climatique (p. ex., McCormick et Lam, 1999). L'accroissement de la température de l'eau, la stratification thermique et les éléments nutritifs disponibles influent sur les concentrations d'oxygène dissous dans les lacs et les réservoirs (La et al., 1987). Les lacs et les échancrures du littoral actuellement anoxiques seraient davantage perturbés par des températures plus élevées et de plus longues périodes de stratification découlant du réchauffement climatique (Schertzer et Sawchuk, 1990). Les effets à long terme des conditions météorologiques sur les comportements saisonniers et inter-annuels des mouvements de l'eau dans les grands lacs sont incertains (Beletsky et al., 1999). Les simulations effectuées avec des modèles de circulation générale et des données sur les années très chaudes ou très froides démontrent qu'une stratification prolongée augmenterait la durée et l'importance des courants dus à la densité. La durée de la couverture de glace des lacs est particulièrement importante, puisque la glace isole efficacement le lac de l'atmosphère. Les relevés pour les grands lacs de la région laurentienne et ceux du bassin du Mackenzie montrent une prolongation significative de la saison d'eaux libres associée aux événements El Niño intenses (Assel, 1999; Walker et al., 1999). Une réduction significative de la couverture de glace aura comme conséquence des températures et une évaporation lacustres plus élevées qui se traduiront par des niveaux d'eau plus bas.

Effets d'autres facteurs de perturbation influencés par les changements climatiques

L'accroissement de la population du Canada se traduira par des pressions sur les lacs et les réservoirs en raison d'une consommation d'eau accrue. Le réchauffement climatique prévu, s'il atteint des degrés qui auront comme conséquence de graves diminutions des niveaux d'eau dans les voies reliant les Grands Lacs, fera en sorte que l'on devra accroître les travaux de dragage pour que le transport maritime demeure viable entre les principaux centres industriels de la région des Grands Lacs. La dérivation de l'eau de grands lacs profonds a longtemps été une question controversée, puisqu'une dérivation sans accroissement du débit pose des risques de réduction à long terme des niveaux d'eau dans les lacs. Si une grave sécheresse affectait les régions centrales de l'Amérique du Nord, on assisterait probablement à une augmentation des pressions exercées pour détourner l'eau des Grands Lacs du Canada et de réseaux hydrographiques étendus afin de donner un répit aux nappes phréatiques amoindries des zones plus sèches du continent. L'eau douce est une précieuse ressource qui n'est pas répartie uniformément à l'échelle de la planète. Le réchauffement climatique pourrait provoquer des conditions de sécheresse dans beaucoup de régions du monde. Comme on considère que le Canada possède de grandes réserves d'eau douce, les pressions internationales iront en augmentant pour que le Canada exporte de l'eau de ses lacs, ce qui réduira ses réserves. Par ailleurs, la production industrielle et manufacturière devrait augmenter dans la région des Grands Lacs. Actuellement, le réseau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent est exploité intensivement pour la production hydroélectrique et la navigation commerciale. Advenant de faibles précipitations et une évaporation élevée, on assisterait à des réductions des niveaux d'eau et des débits dans les voies interlacustres qui compromettraient une telle activité économique. On s'attend à de plus grands conflits entre les multiples utilisateurs au fur et à mesure que la quantité d'eau diminuera. La gestion binationale des eaux pourrait aussi devenir plus difficile en raison de la réduction de l'approvisionnement en eau et de l'accroissement de la demande future pour l'eau douce. Il faudra peut-être apporter des ajustements aux critères officiels et officieux ainsi qu'aux instruments légaux utilisés pour la gestion des ressources hydriques binationales. Les effets du réchauffement climatique qui réduisent la disponibilité de l'eau douce dans les lacs auront également des répercussions sociales. Il faudra en effet s'assurer que les accords avec

les populations autochtones sur la disponibilité et la qualité de l'eau sont respectés. Par ailleurs, l'effet cumulatif des facteurs de perturbation susmentionnés sera amplifié par le réchauffement climatique.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Il faut compter sur des connaissances et des programmes spécifiques pour assurer la viabilité et la disponibilité de réserves d'eau douce non contaminée au Canada.

Réactions climatiques et hydrologiques

- ***Surveillance et bases de données.*** Il faut assurer la surveillance de facteurs tels que les changements saisonniers des caractéristiques hydrologiques des lacs sous l'effet des changements climatiques pour combler le manque de connaissances et atténuer les incertitudes quant aux effets du climat sur les lacs et les réservoirs. La poursuite d'études de cas à long terme sur un éventail de lacs et de régions est une approche à envisager. La surveillance est essentielle si l'on veut établir des bases de données historiques pour déceler les changements dans la disponibilité des ressources en eau.
- ***Inventaire des lacs et des réservoirs.*** Nous avons besoin d'une meilleure documentation sur la superficie, le volume et les changements saisonniers des lacs du Canada, particulièrement dans le Nord. Les moyens de télédétection actuels peuvent être utilisés pour mesurer les changements dynamiques dans les lacs en réponse à la variabilité et aux changements climatiques.
- ***Modélisation des processus.*** Il importe d'améliorer les connaissances sur les processus lacustres pour comprendre les réactions potentielles aux facteurs de perturbation environnementaux et anthropiques. Il faut pousser les recherches pour progresser dans les domaines suivants :
  - modèles de bilans hydriques appliqués aux lacs, aux réservoirs et aux bassins du Canada
  - mise au point de modèles couplés lac-atmosphère pour améliorer les simulations climatiques régionales
  - élaboration de scénarios de changement climatique améliorés et à plus petite échelle (lacustre)
  - compréhension des rétroactions climatiques dans différentes régions du Canada
  - évaluations des incertitudes et des risques
  - amélioration des modèles décisionnels – mise à l'essai d'options d'atténuation et d'adaptation.

Liens entre le réchauffement climatique et les écosystèmes d'eau douce

- ***Qualité de l'eau.*** Des recherches s'imposent pour comprendre les effets du changement des niveaux d'eau et de la hausse des températures de l'eau sur la pollution des lacs, les quantités d'oxygène dissous, les taux de sédimentation et les concentrations d'éléments nutritifs.
- ***Effets sur la santé humaine.*** Il faut pousser l'étude des conséquences possibles d'une baisse des niveaux et d'une hausse des températures de l'eau sur les bactéries présentes dans les lacs qui peuvent nuire à la santé humaine (y compris le goût et les odeurs).
- ***Intégrité des écosystèmes.*** Les changements climatiques auront un effet sur la biodiversité et l'habitat des lacs d'eau douce. Il est possible que le biote aquatique soit fortement affecté, du côté tant de la pêche commerciale que de la pêche sportive. On ne comprend pas parfaitement les effets du climat sur les composantes aquatiques des écosystèmes.
- ***Effets socio-économiques.*** Les lacs et les réservoirs du Canada sont exploités à diverses fins : approvisionnement en eau potable, navigation, activités récréatives et production d'électricité. Il faut faire des évaluations intégrées de la vulnérabilité aux changements de l'approvisionnement en eau, des effets de tels changements et de la capacité d'adaptation à ces changements. Il faut aussi améliorer les modèles sur les processus survenant dans les lacs et les réservoirs et les scénarios climatiques si l'on veut être en mesure d'évaluer la disponibilité future de l'eau douce pour répondre aux demandes socioéconomiques.
- ***Demande d'eau douce.*** La croissance démographique entraînera une plus grande demande d'eau douce de la part des municipalités, de l'industrie et de l'agriculture. C'est dans les lacs, les réservoirs et les eaux souterraines qu'on puisera pour satisfaire à cette demande. Il faut donc faire des recherches pour comprendre quelles sont les limites des sources d'eau douce du Canada eu égard à la demande future.

Besoins en matière de gestion

- ***Élaboration de stratégies.*** Nous devons trouver et évaluer des stratégies d'adaptation pour réduire notre vulnérabilité aux changements touchant l'approvisionnement en eau.
- ***Évaluation des incertitudes.*** Il faut faire des recherches pour évaluer les incertitudes relatives aux données et aux simulations ainsi que les risques et les avantages des différentes stratégies de gestion.
- ***Approches intégrées d'approvisionnement en eau :***
  - approches axées sur la capacité d'approvisionnement (p. ex., accroître la capacité des réservoirs)
  - approches axées sur la demande (p. ex., prix différentiels, campagnes de sensibilisation, exigences réglementaires, mesures de conservation de l'eau pour tous les utilisateurs).
- ***Attribution de l'eau.*** Il faut utiliser de meilleures méthodes pour évaluer les besoins écologiques des

cours d'eau, surveiller l'utilisation de l'eau et attribuer efficacement l'eau dans les bassins et les provinces. Il faut aussi consentir d'autres efforts pour déterminer les utilisations de l'eau prioritaires et identifier les administrations qui tiennent compte des besoins écologiques des cours d'eau.

Nouveaux enjeux

- Évaluation des répercussions environnementales, sociales, économiques et politiques de l'augmentation de la demande d'eau dans le bassin (p. ex., zones intérieures important de l'eau potable des Grands Lacs dans des pipelines) ainsi que des dérivations et des transferts d'eau en vrac entre bassins, particulièrement l'exportation.
- Augmentation de la protection et de la sécurité des lacs et des réservoirs.
- Amélioration de l'approvisionnement en eau par un meilleur acheminement entre les réservoirs et les lacs et une meilleure synchronisation avec les événements hydrologiques.
- Amélioration des modèles climatiques régionaux et des prévisions des changements climatiques en lien avec l'approvisionnement en eau au Canada par l'élaboration et la mise en œuvre de modèles couplés lacatmosphère.
- Évaluation de l'effet des changements de l'approvisionnement en eau douce dans les lacs sur la vulnérabilité des écosystèmes aquatiques, la qualité de l'eau et la production d'électricité.
- Étude d'usages novateurs des ressources en eau, notamment employer l'eau hypolimnique de grands lacs profonds pour les procédés de refroidissement municipaux/industriels.

Références

Allan, R.J., M. Dickman, C.B. Gray et V. Crombie. 1994. « The book of Canadian lakes ». Association canadienne sur la qualité de l'eau, « Monograph Series No. 3 », Gloucester (Ontario), Canada. 598 p.

Assel, R.A. 1999. « Great Lakes ice cover », chapitre 6, p. 1-18. *Dans* D.C.L. Lam et W.M. Schertzer (s. la dir. de), « Potential climate change effects on Great Lakes hydrodynamics and water quality ». American Society of Engineers, ASCE Press, Reston, Virginia, États-Unis. 232 p.

Beletsky, D., K.K. Lee et D.J. Schwab. 1999. « Large-scale circulation », chapitre 4, p. 1-34. *Dans* D.C.L. Lam et W.M. Schertzer (s. la dir. de), « Potential climate change effects on Great Lakes hydrodynamics and water quality ». American Society of Engineers, ASCE Press, Reston, Virginia, États-Unis. 232 p.

Blanken, P.D., W.R. Rouse, A.D. Culf, C. Spence, L.D. Boudreau, J.N. Jasper, B. Kotchtubajda, W.M. Schertzer, P. Marsh et D. Verseghy. 2000. « Eddy covariance measurements of evaporation from Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada ». Water Resour. Res. 36(4): 1069-1078.

Bruce, J.P., I. Burton, H. Martin, B. Mills et L. Mortsch. 2000. Le secteur de l'eau : vulnérabilité et adaptation aux changements climatiques. Rapport final préparé pour Ressources naturelles Canada, Fonds d'action pour le changement climatique. Global Change Strategies International Inc. et Service météorologique du Canada, Ottawa. 144 p. http://www.gcsi.ca/downloads/francais.pdf.

Comité national canadien (CNC). 1975. Relevé canadien du bilan hydrologique des lacs. Rapport de la Décennie hydrologique internationale. Environnement Canada, Ottawa.

Croley II, T.E. 1995. « Laurentian Great Lakes dynamics, climate and response to change », p. 252-296. *Dans* H.R. Oliver et S.A. Oliver (s. la dir. de), « The role of water and the hydrological cycle in global change ». Springer-Verlag, New York.

Hamilton, S., N. Crookshank et D.C.L. Lam. 2001. « Hydrologic and hydraulic routing and decision support in the Seymour Watershed, final report for Greater Vancouver Regional District Watershed Management Branch ». Rapport conjoint d'Environnement Canada et du Conseil national de recherches du Canada (Centre d'hydraulique canadien), Ottawa. 96 p.

Lam, D.C.L. et W.M. Schertzer (s. la dir. de). 1999. « Potential climate change effects on Great Lakes hydrodynamics and water quality ». American Society of Engineers, ASCE Press, Reston, Virginia, États-Unis. 232 p.

Lam, D.C.L., W.M. Schertzer et A.S. Fraser. 1987. « A post-audit analysis of the NWRI nine-box water quality model for Lake Erie ». J. Great Lakes Res. 13(4): 782-800.

Marsh P. et L.F.W. Lesack. 1996. « The hydrological regime of perched lakes in the Mackenzie Delta: potential responses to climate change ». Limnol. Oceanogr. 41(5): 849-856.

McCormick, M.J. et D.C.L. Lam. 1999. « Lake thermodynamics », chapitre 3, p. 1-17. *Dans* D.C.L. Lam et W.M. Schertzer (s. la dir. de), « Potential climate change effects on Great Lakes hydrodynamics and water quality ». American Society of Engineers, ASCE Press, Reston, Virginia, États-Unis. 232 p.

Mortsch, L., H. Hengeveld, M. Lister, B. Lofgren, F. Quinn, M. Slivitsky et L. Wenger. 2000. « Climate change impacts on the hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence System ». Can. Water Resour. J. 25(2): 153-179.

Rouse, W.R., C.M. Oswald, J. Binyamin, C. Spence, W.M. Schertzer et P.D. Blanken. 2003. « Interannual variability of the surface energy balance and temperature of central Great Slave Lake ». J. Hydrometeor., 4: 720-730.

Rouse, W.R., C.J. Oswald, C. Spence, W.M. Schertzer et P.D. Blanken. 2002. « Cold region lakes and landscape evaporation », p. 37-42. *Dans* P. di Cenzo et L. W. Martz (s. la dir. de), « Proceedings of the 2nd GAME-MAGS Joint International Workshop, GEWEX-MAGS Secretariat ».

Schertzer, W.M. 1997. « Fresh water lakes », chapitre 6, p. 124-148. *Dans* W.G. Bailey, T.R. Oke et W.R. Rouse (s. la dir. de), « Surface climates of Canada ». McGill-Queens University Press. 369 p.

Schertzer, W.M. et T.E. Croley. 1999. « Climate and lake responses », chapitre 2, p. 1-74. *Dans* D.C.L. Lam et W.M. Schertzer (s. la dir. de), « Potential climate change

effects on Great Lakes hydrodynamics and water quality ». American Society of Engineers, ASCE Press, Reston, Virginia, États-Unis. 232 p.

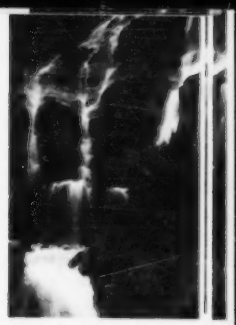
Schertzer, W.M., W.R. Rouse et P.D. Blanken. 2000. « Cross-lake variation of physical limnological and climatological processes of Great Slave Lake ». Phys. Geog. 21: 385-406.

Schertzer, W.M. et A.M. Sawchuk. 1990. « Thermal structure of the lower Great Lakes in a warm year: Implications for the occurrence of hypolimnion anoxia ». Trans. Amer. Fish. Soc. 119(2): 195-209.

Schindler, D., S. Bayley, B. Parker, K. Beaty, D. Cruikshank, E. Fee, E. Schindler et M. Stainton. 1996. « The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, Northwestern Ontario ». Limnol. Oceanogr. 41(5): 1004-1017.

Stewart, R.E., R.W. Crawford, H.G. Leighton, P. Marsh, G.S. Strong, G.W.K. Moore, H. Ritchie, W.R. Rouse, E.D. Soulis et B. Kochtubajda. 1998. « The Mackenzie GEWEX study: the water and energy cycles of a major North American river system ». Bull. Amer. Meteor. Soc. 79: 2665-2683.

Walker, A.E., A. Silis, J. Metcalf, M. Davey, R. Brown et B. Goodison. 1999. « Snow cover and lake ice determination in the MAGS region using passive microwave satellite and conventional data », p. 89-91. *Dans* « Proc. 4th Scientific Workshop for the Mackenzie GEWEX Study (MAGS) », Montreal (Québec). Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie et Environnement Canada.



Chapter 13

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – MILIEUX HUMIDES

Garth van der Kamp et Philip Marsh

Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Saskatoon (Sask.)

Situation actuelle

Superficie et caractéristiques des milieux humides du Canada

Selon le Groupe de travail national sur les terres humides (GTNTH), un milieu humide se définit comme étant un terrain où la nappe phréatique est à proximité ou au-dessus de la surface (Groupe de travail national sur les terres humides, 1988). Les expressions suivantes, entre autres, sont aussi utilisées pour désigner un milieu humide : marécage, marais, tourbière, muskeg et mare vaseuse. En règle générale, les milieux humides sont en majeure partie occupés par une végétation hydrophile, ce qui comprend des saules, des cypéracées, des quenouilles, des scirpes et des mousses. Lorsqu'on y trouve de l'eau libre, sa profondeur est généralement inférieure à 2 mètres. À l'opposé des lacs (voir le chapitre 12), l'eau libre est très peu profonde ou n'occupe qu'une petite partie seulement de la superficie totale du milieu humide.

Les milieux humides occupent 14 % de la superficie du Canada, soit environ 1 300 000 km^2, ce qui est légèrement plus grand que la province de l'Ontario. On trouve principalement les milieux humides dans les régions arctiques, subarctiques, boréales et tempérées ainsi que dans les prairies et les montagnes (figure 1). Les tourbières, que l'on trouve surtout dans les régions boréales et subarctiques, sont de loin les milieux humides les plus courants, leur superficie étant d'environ 1 100 000 km^2, ce qui équivaut à 85 % de la superficie totale des milieux humides au Canada.

Les milieux humides canadiens peuvent être regroupés en cinq grandes classes selon leurs différentes caractéristiques : les bogs, les fens, les marécages, les marais et les étendues d'eau peu profonde (Groupe de travail national sur les terres humides, 1997). L'eau des bogs, qui sont surtout couverts de mousse de sphaignes, provient uniquement des précipitations. Les fens reçoivent des eaux souterraines ainsi que des précipitations et on y trouve des cypéracées, des mousses et d'autres formes de végétation. Les bogs et les fens sont sujets à l'accumulation de tourbe. Les marécages renferment peu d'eau stagnante, sont dominés par un couvert d'arbres et d'arbustes et peuvent accumuler la tourbe. Les marais renferment de l'eau stagnante persistante et sont couverts d'une végétation aquatique émergente, mais de peu de mousses. Les étendues d'eau peu profonde se caractérisent par un nappe d'eau libre stagnante sur la majeure partie de leur superficie et leur végétation est surtout composée de plantes aquatiques submergées ou flottantes. La tourbe ne se forme pas dans les marais et les étendues d'eau peu profonde.

Les milieux humides, de par leur nature même, se trouvent là où la surface du sol est humide ou couverte d'une eau peu profonde pendant la majeure partie de l'année. La plupart des milieux humides du Canada se forment sur des terrains plats et mal drainés ou dans des dépressions du paysage. Les milieux humides peuvent également se former sur les inclinaisons et les terres hautes qui reçoivent constamment de l'eau des précipitations ou de la fonte des neiges ou par résurgence des eaux souterraines. Les castors ont créé de nombreux milieux humides, surtout dans les régions boréales et subarctiques, par la construction de leurs barrages.

Bon nombre de Canadiens ne connaissent les milieux humides que par ce qu'ils ont vu dans les parcs nationaux et les réserves naturelles des régions urbaines. Ces marécages ou ces étendues d'eau peu profonde qui sont plus ou moins artificiels servent généralement de bassins de retenue des eaux pluviales. Par rapport aux autres types de milieux humides, la superficie totale des milieux humides des régions urbaines est minuscule, mais ceux-ci sont très importants parce qu'ils ont une influence sur la vie quotidienne et les loisirs de nombreux Canadiens.

Fonctions et valeurs des milieux humides

On estimait auparavant que les milieux humides étaient des terres inutilisables à des fins productives et qu'ils devaient être remplis ou drainés. Cette manière de voir évolue, et on reconnaît que les milieux humides ont de nombreuses et importantes fonctions et valeurs (Gouvernement du Canada, 1991). Parce qu'ils emmagasinent l'eau et la libèrent lentement, les milieux humides peuvent réapprovisionner les aquifères, réduire les débits de pointe pendant les inondations et contribuer au maintien du débit dans les cours d'eau pendant les périodes de sécheresse. Dans les régions où ils occupent une grande partie du paysage, comme le

bassin du fleuve Mackenzie, leur surface humide peut également avoir un effet modérateur sur le climat en conservant l'évapotranspiration à l'échelle régionale, même pendant des périodes prolongées de sécheresse (Rouse et al., 2003).

Les milieux humides représentent un habitat vital et extrêmement productif pour les poissons et la faune ainsi que pour de nombreux types de végétaux uniques. Ils fournissent d'importantes ressources naturelles pour la chasse et la pêche et sont très appréciés pour les possibilités récréatives qu'ils offrent, comme l'observation d'oiseaux. Le Plan nord-américain de gestion de la sauvagine met fortement l'accent sur la protection des milieux humides et l'amélioration des habitats.

Les milieux humides absorbent et retiennent les contaminants, comme les métaux lourds et le soufre des pluies acides et qui leur sont transmis par les précipitations et les eaux de ruissellement ainsi que par la résurgence des eaux souterraines. Ils peuvent également remplir un rôle correctif important, car de nombreux contaminants, comme les nitrates, sont décomposés de façon permanente dans les milieux humides.

L'importance du rôle des milieux humides du Canada dans le bilan mondial du carbone suscite de plus en plus d'intérêt. Tous les milieux humides emmagasinent le carbone de source organique, mais nos tourbières jouent un rôle particulièrement important à cet égard, car elles renferment environ 150 milliards de tonnes de carbone sous la forme de tourbe, ce qui équivaut à 25 fois la quantité de carbone des carburants fossiles qui est libérée chaque année dans le monde entier (Roulet, 2000). Les réserves de carbone des tourbières se sont accumulées pendant des milliers d'années et continuent probablement d'augmenter très lentement d'une année à l'autre. Tant que les tourbières sont saturées d'eau à proximité de leur surface, les stocks de carbone restent stables. Dans le contexte des changements climatiques, toutefois, la disponibilité d'eau en quantité suffisante pour le maintien des tourbières constitue une préoccupation majeure. La perte de carbone des tourbières en raison du feu ou d'une dégradation pouvant être causés par des conditions de sécheresse accrues augmenterait les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, alors que l'inondation des tourbières pourrait mener à une augmentation des émissions de méthane – un gaz à effet de serre puissant. D'une façon ou d'une autre, une déstabilisation des tourbières d'origine climatique au Canada pourrait avoir des répercussions significatives sur les changements climatiques à l'échelle planétaire.

Vulnérabilité aux changements climatiques

Les milieux humides sont alimentés en eau par les précipitations et par l'écoulement de surface, la neige et l'écoulement souterrain provenant des zones sèches environnantes. Ils perdent leur eau par l'évaporation, la transpiration des plantes, ainsi que l'écoulement de surface et souterrain. Le bilan hydrique de la plupart des milieux humides dépend donc de la végétation qu'on y trouve ainsi que de l'aménagement du territoire et de la couverture végétale dans les terrains élevés avoisinants.

Compte tenu de la grande superficie humide et des faibles profondeurs, les milieux humides sont particulièrement sensibles aux pertes d'eau dues à l'évapotranspiration. Toute variation climatique qui modifie à la hausse le rapport entre cette évaporation et l'importance des précipitations est susceptible d'entraîner l'assèchement des milieux humides. Les hivers plus courts et plus chauds et les étés plus longs qui sont prédits par la plupart des scénarios climatiques (et qui sont déjà une réalité dans l'Ouest du Canada) laissent supposer que nos milieux humides seront soumis à un stress accru résultant de la pénurie d'eau, à moins que l'augmentation des pertes dues à l'évapotranspiration soient compensée par l'augmentation des précipitations.

Un bon nombre des milieux humides du Canada doivent leur existence, en partie tout au moins, à nos hivers rigoureux ainsi qu'au pergélisol, au sol gelé, à l'accumulation locale de neige emportée par le vent et aux embâcles qui caractérisent nos hivers. Ces milieux humides existent notamment en vertu du pergélisol sous-jacent qui entrave le drainage, comme nombre de milieux humides arctiques et subarctiques (Rouse et al., 1997). Dans les montagnes et les régions arctiques, les petits milieux humides qui dépendent de l'eau de fonte des accumulations de neige persistantes sont également très sensibles au réchauffement du climat. Des millions de petits marais des prairies, souvent appelés mares, doivent leur existence à la neige qui y est soufflée et à l'eau de fonte qui s'écoule au début du printemps sur le sol gelé des terres avoisinantes. Certaines rives marécageuses et certains milieux humides des deltas doivent leur existence à des inondations annuelles ou quasi annuelles (p. ex. Marsh et Hey, 1994) et s'assècheront si les niveaux d'eau de pointe des cours d'eau s'élèvent moins en raison de la réduction des courants d'eau douce formés par la fonte des neiges au printemps ou du nombre moindre d'embâcles. Tous ces milieux humides des régions froides seront mis en péril par des hivers plus courts et plus chauds, quelle que soit le comportement des précipitations.

Certains types de milieux humides risquent moins d'être touchés par les changements climatiques. C'est le cas des milieux humides qui sont alimentées par de grands réseaux d'eau souterraine en profondeur (voir le chapitre 10) dont l'écoulement tend à rester constant, même lorsque les variations climatiques sont grandes (Winter, 2000). De nombreux fens pourraient faire partie de cette catégorie si les eaux souterraines qui y circulent représentent une part importante de leur approvisionnement total en eau. Les milieux humides dont les débits entrants et les débits sortants des eaux de sur-

face sont maintenus en équilibre pourraient être peu touchés par les changements climatiques. Les marais en bordure des lacs et des cours d'eau où les niveaux d'eau sont stables y seront probablement insensibles.

La majeure partie des tourbières semblent relativement stables et elles persistent et se développent depuis des milliers d'années, à travers de longues périodes de précipitations et de sécheresse. De récentes études sur le terrain permettent de penser que les taux actuels de croissance des tourbières sont semblables à ceux des mille dernières années. Leur stabilité future est toutefois incertaine, compte tenu des changements climatiques. Les bogs sont vulnérables aux changements des précipitations parce que celles-ci sont leur unique source d'approvisionnement en eau. Nombre de tourbières de la région subarctique ou de la partie septentrionale de la région boréale reposent totalement ou en partie sur un pergélisol mince et discontinu (figure 1); le réchauffement climatique mettra en péril ces milieux humides en provoquant le dégel et le recul du pergélisol.

Le scénarios de réchauffement climatique laissent entrevoir que la limite sud de la région boréale pourrait se déplacer vers le nord de plusieurs centaines de kilomètres d'ici plusieurs dizaines d'années. La réalité de cette possibilité est attestée par le fait qu'il y a 6 000 ans, la frontière sud de la forêt boréale et des tourbières se trouvait de 200 à 400 kilomètres plus au nord que maintenant (Vitt et al., 2000). À l'époque, le climat du Nord du Canada était plus chaud, parce que cette région recevait plus d'énergie solaire en raison de la lente modification de l'inclinaison de l'axe de la Terre. Si la limite sud de la forêt boréale se déplace effectivement beaucoup plus au nord, les tourbières pourraient également se détériorer et peut-être disparaître. Les ressources hydriques de la région se modifieraient radicalement et de grandes quantités de carbone seraient libérées dans l'atmosphère.

Situation actuelle

À l'heure actuelle, il y a peu de surveillance à l'échelle régionale de l'état des milieux humides (niveaux d'eau, superficie, végétation, etc.,) des régions boréales, subarctiques et arctiques ainsi que des montages, mais on surveille certains milieux humides ou certains complexes de milieux humides dans le cadre d'études approfondies (Cihlar et Tarnocai, 2000). Dans la région des prairies et la lisière méridionale de la forêt boréale de l'Ouest, des dénombrements annuels des mares, qui sont effectués à des fins de gestion de la sauvagine, fournissent un inventaire précis des milieux humides depuis 1955 (Conly et van der Kamp, 2001). On peut supposer que les milieux humides en région tempérée font l'objet d'une étroite surveillance de la part des organismes locaux puisqu'ils sont situés dans des régions densément peuplées.

Les bogs et les fens des régions boréales et subarctiques ont été relativement épargnés par l'homme, même si les répercussions de la coupe à blanc et de la construction de routes peuvent être importantes dans le sud de la forêt boréale. En région boréale, le pergélisol se trouve presque exclusivement dans les tourbières. La répartition actuelle du pergélisol dans le Sud est en partie un

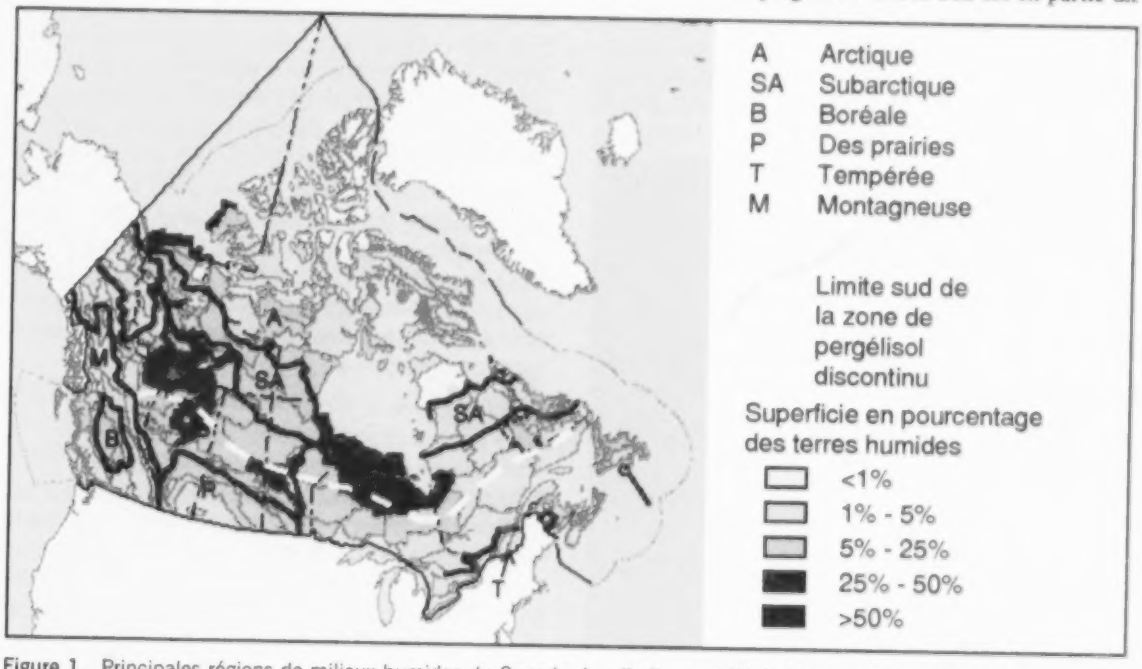


Figure 1. Principales régions de milieux humides du Canada. Les limites ont été établies par le GTNTH (1988). L'arrière-plan de couleur représente le pourcentage de la superficie couverte par les milieux humides (Atlas du Canada, http://atlas.gc.ca).

face sont maintenus en equilibre pourraient être peu touches par les changements climatiques. Les marais en bordure des lacs et des cours d'eau ou les niveaux d'eau sont stables y seront probablement insensibles.

La majeure partie des tourbieres semblent relativement stables et elles persistent et se développent depuis des milliers d'années, à travers de longues periodes de precipitations et de sécheresse. De recentes etudes sur le terrain permettent de penser que les taux actuels de croissance des tourbieres sont semblables à ceux des mille dernieres annees. Leur stabilite future est toutefois incertaine, compte tenu des changements climatiques. Les bogs sont vulnerables aux changements des precipitations parce que celles-ci sont leur unique source d'approvisionnement en eau. Nombre de tourbieres de la region subarctique ou de la partie septentrionale de la region boreale reposent totalement ou en partie sur un pergelisol mince et discontinu (figure 1); le rechauffement climatique mettra en péril ces milieux humides en provoquant le dégel et le recul du pergélisol.

Le scenarios de réchauffement climatique laissent entrevoir que la limite sud de la region boreale pourrait se déplacer vers le nord de plusieurs centaines de kilometres d'ici plusieurs dizaines d'annees. La réalité de cette possibilite est attestee par le fait qu'il y a 6 000 ans, la frontiere sud de la forêt boreale et des tourbieres se trouvait de 200 à 400 kilometres plus au nord que maintenant (Vitt et al., 2000). À l'époque, le climat du Nord du Canada était plus chaud, parce que cette région recevait plus d'énergie solaire en raison de la lente modification de l'inclinaison de l'axe de la Terre. Si la limite sud de la forêt boreale se déplace effectivement beaucoup plus au nord, les tourbieres pourraient également se détériorer et peut-être disparaître. Les ressources hydriques de la région se modifieraient radicalement et de grandes quantités de carbone seraient libérées dans l'atmosphère.

Situation actuelle

À l'heure actuelle, il y a peu de surveillance à l'échelle régionale de l'état des milieux humides (niveaux d'eau, superficie, végétation, etc.) des régions boreales, subarctiques et arctiques ainsi que des montages, mais on surveille certains milieux humides ou certains complexes de milieux humides dans le cadre d'études approfondies (Cihlar et Tarnocai, 2000). Dans la région des prairies et la lisière méridionale de la forêt boreale de l'Ouest, des dénombrements annuels des mares, qui sont effectues à des fins de gestion de la sauvagine, fournissent un inventaire précis des milieux humides depuis 1955 (Conly et van der Kamp, 2001). On peut supposer que les milieux humides en région tempérée font l'objet d'une étroite surveillance de la part des organismes locaux puisqu'ils sont situes dans des régions densement peuplees.

Les bogs et les fens des régions boreales et subarctiques ont été relativement épargnés par l'homme, même si les répercussions de la coupe à blanc et de la construction de routes peuvent être importantes dans le sud de la forêt boreale. En région boreale, le pergélisol se trouve presque exclusivement dans les tourbieres. La répartition actuelle du pergélisol dans le Sud est en partie un

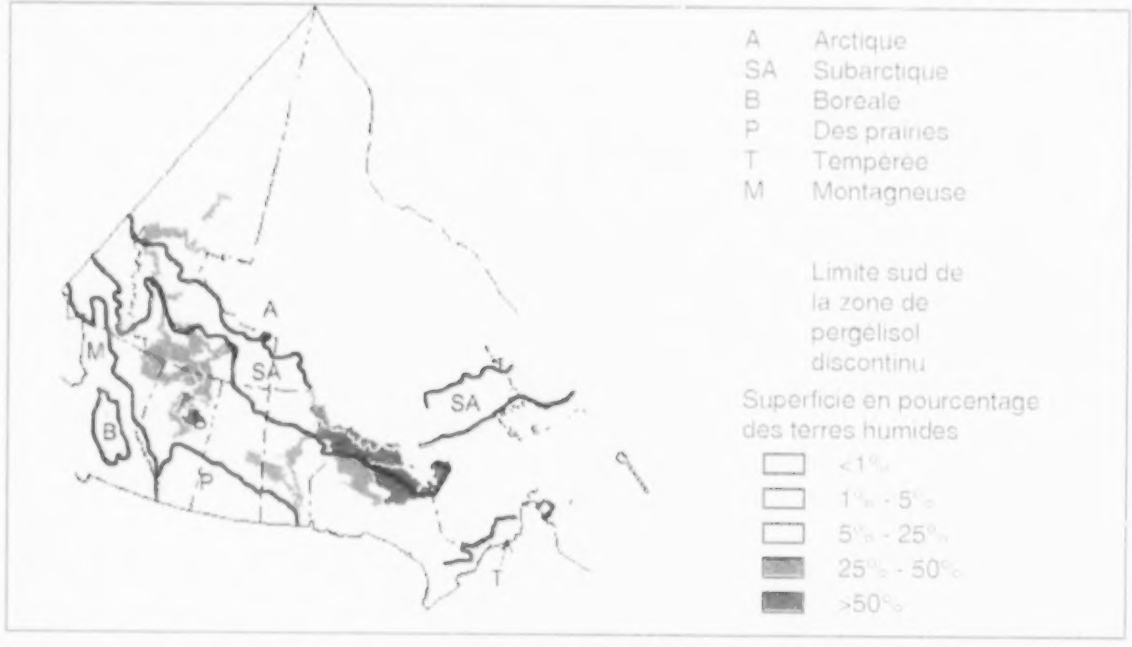


Figure 1. Principales régions de milieux humides du Canada. Les limites ont été établies par le GTNTH (1988). L'arrière-plan de couleur représente le pourcentage de la superficie couverte par les milieux humides (Atlas du Canada, http://atlas.gc.ca).

vestige du Petit âge glaciaire (approx. de 1400 à 1850) et n'est pas en état d'équilibre par rapport au climat actuel (Vitt et al., 1999). Dans une vaste zone est-ouest de l'ouest de la forêt boréale, qui longe la limite sud du pergélisol discontinu (figure 1), les tourbières sont touchées par le réchauffement climatique depuis les 100 dernières années. Le dégel du pergélisol y entraîne l'affaissement de la surface de la tourbe et une humidité accrue à l'intérieur de celle-ci.

Les milieux humides des régions tempérées (sud de l'Ontario et du Québec et sud-ouest de la Colombie-Britannique) ont une superficie relativement petite, mais se trouvent dans la zone où se concentre la population et sont fortement affectés par le drainage effectué aux fins de l'agriculture et de l'urbanisation. L'exploitation de la tourbe en horticulture ainsi que les changements qui affectent les eaux de ruissellement en provenance des régions avoisinantes, la végétation (p. ex. culture, introduction de la salicaire) et les populations fauniques (castors et rats musqués) sont également des facteurs qui affectent les milieux humides.

Les marais des rives des Grands Lacs sont relativement stables mais dépendent de cycles pluriannuels d'humidité et de sécheresse qui influent sur les niveaux d'eau des lacs (Mortsch, 1998). Le soulèvement post-glaciaire, qui s'est manifesté principalement dans la baie d'Hudson, a imposé un changement lent et à long terme de ces milieux humides par l'entremise du basculement continu de la croûte terrestre. Cette glacio-isostasie a un effet déterminant sur le développement des vastes tourbières au sud et à l'ouest de la baie d'Hudson (figure 1).

Les milieux humides des deltas et des plaines inondables dépendent principalement des niveaux de pointe de l'eau des rivières, qui sont causés par de très grands débits et les embâcles (Marsh et Hey, 1994). Nombre de ces milieux humides ont été touchés par la variation des régimes d'écoulement attribuable à l'exploitation des barrages et des réservoirs, et la situation continuera d'évoluer à mesure que les lits des cours d'eau s'adapteront lentement aux nouveaux régimes (voir les chapitres 2 et 4).

Un milieu humide de prairie sur le mont Allan, en Saskatchewan.

Les milieux humides des prairies sont dans une zone semi-aride où l'évaporation possible est supérieure aux précipitations. Ils sont presque tous situés dans de petits bassins hydrographiques fermés et ils traversent des cycles pluriannuels d'humidité et de sécheresse, ce qui fait que le nombre de milieux humides renfermant de l'eau stagnante peut varier par un facteur de 10 en quelques années (Conly et van der Kamp, 2001). La grande majorité de ces milieux humides se trouvent dans des champs cultivés privés et sont peu réglementés. De nombreux milieux humides des prairies ont été asséchés et le drainage se poursuit, particulièrement le long de la zone limitrophe de la région boréale, où le surplus d'eau gêne l'exploitation agricole la plupart des années.

Tendances

Dans la région boréale de l'Ouest du Canada, la détérioration du pergélisol modifie la nature de beaucoup de tourbières. La limite sud de pergélisol discontinu s'est déplacée vers le nord de dizaines de kilomètres dans les dernières décennies et continuera de se déplacer (Vitt et al., 1999). Les vastes plateaux tourbeux dans la partie septentrionale de la région boréale, qui reposent actuellement sur le pergélisol, seront de plus en plus mis en péril. Les caractéristiques des tourbières en matière de stockage et de libération de l'eau se modifient avec le dégel du pergélisol sous-jacent, et on peut prévoir que ces changements influeront sur les modifications des débits d'eau et du climat. La disparition du pergélisol sous les tourbières peut également entraîner un accroissement des taux de stockage à long terme du carbone sous la forme de tourbe, parce que les tourbières reposant sur le pergélisol tendent à être relativement sèches et vulnérables au feu (Robinson et Moore, 2000; Vitt et al., 2000). Ce recul du pergélisol peut être considéré comme étant l'impact actuel le plus important des changements climatiques sur les milieux humides du Canada.

Dans les régions arctiques et subarctiques, les étés plus longs et plus chauds s'accompagneront d'une couche active (dégelée) plus profonde, de l'assèchement de certains milieux humides et de la création d'autres milieux humides. Les zones de pergélisol riches en glace, qui se trouvent pour la plupart dans des sédiments mous non consolidés, sont particulièrement vulnérables (Beilman et al., 2001).

Aucun changement général quant aux limites sud ou nord des tourbières ne semble avoir été signalé au cours de dernières décennies, ce qui permet de supposer que

si de tels changements surviennent, ils sont, pour le moment du moins, mineurs et difficiles à déceler au milieu de ceux qui touchent l'aménagement du territoire et des effets de la variabilité climatique. Le drainage et l'exploitation ont réduit la superficie de nombreuses tourbières des régions tempérées et de quelques tourbières dans le sud de la région boréale. Les répercussions locales de ces changements sont grandes mais, par rapport à la superficie totale des tourbières, l'impact à l'échelle du Canada est faible.

Le nombre de milieux humides dans les prairies et les niveaux d'eau de ceux-ci laissent voir des variations importantes d'une année à l'autre depuis 1955, lorsque leur surveillance a débuté (Conly et van der Kamp, 2001). Le drainage des milieux humides a certainement un gros impact sur leur présence dans certaines régions mais, dans l'ensemble, le pourcentage de milieux humides détruits par le drainage semble avoir été de l'ordre de 2 à 4 % par décennie au cours des cinquante dernières années (Watmough et al., 2002). Pour ce qui est des zones sèches avoisinantes, on a constaté un déclin marqué de la superficie des jachères, qui est passée de 30 % en 1985 à 10 % en 1999, et une légère augmentation de la proportion de terres non cultivées (Watmough et al., 2002). D'autres changements graduels et subtils continuent de se produire dans les pratiques agricoles et l'utilisation des sols, comme le virage actuel vers le chaume haut et le travail minimal du sol. Ces modifications de l'utilisation des sols dans les zones sèches peuvent avoir un impact à l'échelle régionale en conservant l'humidité des zones sèches et en diminuant le ruissellement vers les milieux humides (van der Kamp et al., 1999). Les effets des changements climatiques continueront probablement d'être éclipsés par d'importantes variations d'une année à l'autre dans les précipitations et le ruissellement, les effets cumulatifs du drainage des milieux humides et l'évolution continue des pratiques agricoles et de l'utilisation des sols.

Les milieux humides des deltas et des plaines inondables du Sud du Canada deviendront plus dépendants du ruissellement maximal des pluies estivales et moins dépendants des crues et des embâcles au printemps (Prowse et Beltaos, 2002). La diminution correspondante des débits de pointe ainsi que les périodes d'évaporation plus longues en été entraîneront probablement l'assèchement de certains des milieux humides des plaines inondables.

Les milieux humides en zone tempérée seront touchés par les changements climatiques mais, étant donné qu'ils se trouvent dans les régions les plus peuplées du Canada, leur état sera surtout préoccupant en raison des effets directement attribuables à l'action humaine, y compris le drainage, l'urbanisation, les sels de voirie et le ruissellement à partir des routes.

Nouveaux enjeux

Les impacts des changements climatiques sur les tourbières boréales et subarctiques du Canada peuvent être grands et avoir des implications importantes pour le bilan du carbone atmosphérique mondial. De vastes tourbières semblables existent dans le Nord de la Russie. Elles ont une superficie totale qui équivaut à deux fois celle des tourbières canadiennes (Zhulidov et al., 1997), et c'est précisément dans ces régions boréales et subarctiques que les changements climatiques seront les plus grands, et sont déjà bien amorcés. On sait toutefois encore peu de choses sur la réaction possible des tourbières du Canada aux changements climatiques ou à des conditions de sécheresse prolongées, ni si la gestion des tourbières et des zones sèches avoisinantes peut être une solution réaliste pour maintenir le bilan hydrique des tourbières et protéger le carbone qui y est stocké.

Les programmes actuels de surveillance pourraient ne pas déceler les changements à long terme de l'état des milieux humides du Canada en raison des changements climatiques et d'autres impacts (Cihlar et Tarnocai, 2000). Ainsi, la limite méridionale de la région boréale pourrait se déplacer vers le nord de 200 à 400 km d'ici 2050; cette région retrouverait alors une superficie équivalente à celle qu'elle avait lorsque le climat était plus clément sur la majeure partie du Canada au début de la période de l'holocène (il y a environ de 8 000 à 5 000 ans). Il est très peu certain que ce recul des milieux humides de la région boréale survienne, mais si c'est le cas, la perte de tourbe par combustion et décomposition représenterait un apport important de carbone dans l'atmosphère terrestre. Le développement vers le nord des tourbières qui accompagnerait ce phénomène ne pourrait pas vraiment compenser pour les pertes de carbone dans le Sud, car la tourbe ne s'accumule que très lentement – à un taux inférieur à un millimètre par année (Vitt et al., 2000). En l'absence de données adéquates sur les tendances passées et actuelles, il sera impossible de déceler rapidement tout changement graduel mais critique des tourbières et l'évaluation de stratégies possibles de préservation des tourbières sera sérieusement compromise.

La capacité des milieux humides à recevoir temporairement les eaux de crue peut nettement contribuer à atténuer les inondations, tout au moins à l'échelle locale, comme le prouve l'usage généralisé des bassins de retenue des eaux pluviales dans les régions urbaines (Anderson et al., 2002). Les milieux humides pourraient aider à réduire les inondations même dans les grands bassins hydrographiques, si leur capacité totale de stockage est suffisante. En remplissant ce rôle, les milieux humides contribueraient également à la protection de l'habitat faunique, au piégeage du carbone, à la lutte contre l'érosion et à l'amélioration de la qualité de l'eau. De vastes régions de milieux humides ont été drainées

à des fins agricoles. Les effets de ce drainage sur les débits de pointe dans les cours d'eau et l'éventuel effet modérateur de la remise en état des milieux humides ne sont pas bien compris et pourraient n'avoir aucune importante dans les cas de crue extrême (Juliano et Simonovic, 1999). Les modèles hydrologiques actuels servant à établir le bilan hydrique des milieux humides et les débits des cours d'eau ne tiennent pas très bien compte des effets des milieux humides pour ce qui est du stockage et de la libération de l'eau (Price et Waddington, 2000). Compte tenu des avantages hydrologiques et écologiques d'une diminution des inondations par le maintien et la remise en état des milieux humides à l'échelle du paysage, il est évident que le rôle des milieux humides à cet égard devrait être pris plus au sérieux et qu'une évaluation multidisciplinaire plus rigoureuse s'impose.

Des milieux humides de plaines d'inondation, de deltas et de rives de lacs ont été touchés par les changements des régimes d'écoulement et des niveaux de cours d'eau attribuables à l'exploitation de réservoirs. En outre, ils seront de plus en plus touchés par les changements climatiques, notamment l'écoulement printanier moindre et plus précoce et l'importance accrue des inondations estivales (Marsh et Lesack, 1996). La nature de ces impacts n'est pas bien comprise pour l'heure, et on commence à peine à trouver des mesures de gestion pour protéger les milieux humides.

L'existence des milieux humides des prairies dépend de l'écoulement printanier de l'eau de fonte de la neige sur un sol cultivé et gelé. Les agriculteurs s'orientent actuellement vers des méthodes, comme la culture sur haut chaume, le travail minimal du sol, la monoculture et la conversion à l'agriculture herbagère, qui retiennent la neige dans les zones sèches et conservent l'humidité des sols,. Ce virage est susceptible d'avoir un impact régional en réduisant l'écoulement vers les milieux humides (voir le chapitre 7). Les changements climatiques peuvent également entraîner une augmentation de l'évaporation par rapport aux précipitations et à l'écoulement de surface. On peut donc conclure que les milieux humides des prairies sont sérieusement en péril. On possède actuellement peu d'information sur l'efficacité des diverses pratiques de gestion des terres pour ce qui est de la conservation des milieux humides.

Les changements subis par le biote attribuables à l'activité humaine ou aux changements climatiques peuvent avoir un impact important sur les milieux humides. Les changements des populations de castors ont eu par le passé un impact étendu dans certaines régions du Canada. Les changements dans la végétation, comme la disparition d'ormes victimes de la maladie hollandaise de l'orme ou l'envahissement par la salicaire, peuvent influer sur le bilan hydrique et l'équilibre écologique des milieux humides. Les changements climatiques sont susceptibles d'avoir d'autres répercussions sur le biote des milieux humides, par exemple en réduisant la profondeur et la durée du gélisol ou en faisant en sorte que les niveaux d'eau de pointe et l'assèchement ultérieur surviennent plus tôt dans la saison de croissance.

Nombre des dangers qui menacent les milieux humides du Canada ont des aspects sociaux, économiques et environnementaux. Les politiques et la réglementation gouvernementales qui ont des répercussions sur les milieux humides sont parfois contradictoires ou incompatibles. L'opinion encore largement répandue et bien enracinée dans notre culture est que les milieux humides sont des endroits « à améliorer » qui devraient faire l'objet d'une exploitation agricole ou forestière ou qui devraient être asséchés et remplis à des fins domiciliaires ou industrielles. Le climat d'idées évolue lentement, mais les milieux humides ne suscitent pas encore un intérêt public ni un soutien politique.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Il faut instaurer un programme national de surveillance des milieux humides (Cihlar et Tarnocai, 2000). En plus de mesurer directement les niveaux d'eau, ce programme devrait faire appel à la télédétection et à la photographie aérienne et comprendre des inventaires de la végétation et de la faune, des repères stables pour déceler des changements d'épaisseur de la tourbe ainsi que des points fixes pour la prise de photos récurrentes. Les données recueillies permettraient de surveiller les changements dans la présence et l'état des milieux humides du Canada.

Compte tenu des importantes répercussions nationales et mondiales de la dynamique des tourbières dans le cadre des changements climatiques, l'urgence de mieux connaître les tourbières du Nord du Canada s'impose. L'impact des changements climatiques sur la limite sud des milieux humides de la région boréale doit être mieux compris. Assisterons-nous à la détérioration et au recul des milieux humides? Ceux-ci se maintiendront-ils et même se développeront-ils? La réponse à ces questions dépendra de l'interaction complexe des régimes de températures, des changements des chutes de neige et de pluie, des processus chimiques en milieu aquatique et de la végétation. Il faut étudier davantage le rôle du gel saisonnier et du pergélisol dans la dynamique des tourbières parce que le réchauffement est une conséquence évidente et déjà en place des changements climatiques et que ses effets sur les milieux humides sont encore mal connus et difficiles à prévoir.

Les lacunes en ce qui concerne l'hydrologie des milieux humides des modèles hydrologiques doivent être comblées. Des modèles fiables et réalistes permettront de mieux prévoir les répercussions des changements climatiques sur les milieux humides ainsi que d'anticiper

et d'analyser les incidences de la dynamique des milieux humides sur les crues et le débit d'étiage. De tels modèles hydrologiques permettraient d'évaluer les possibilités d'utilisation des milieux humides pour atténuer les inondations, de même que les impacts possibles des changements climatiques sur l'écologie de ces milieux.

L'évaluation des effets possibles des nouvelles pratiques agricoles sur les milieux humides des praires permettrait d'adapter les politiques et les méthodes de gestion afin d'optimiser l'équilibre entre l'exploitation agricole et la conservation des milieux humides. Les impacts de l'exploitation forestière et des autres perturbations des milieux humides de la région boréale doivent être mieux compris pour que les pratiques puissent être adaptées.

Références

Anderson, B.C., W.E. Watt et J. Marsalek. 2002. « Critical issues for stormwater ponds: learning from a decade of research ». Water Sci. Technol. 45: 277-283.

Beilman, D.W., D.H. Vitt et L.A. Halsey. 2001. « Localized permafrost peatlands in western Canada: definition, distributions and degradation ». Arctic, Antarctic Alpine Res. 33: 70-77.

Cihlar, J. et C. Tarnocai (s. la dir. de). 2000. « Wetlands of Canada and climate change: observation strategy and baseline data ». Rapport d'un atelier tenu les 24 et 25 janvier 2000, Ottawa (Ont.).

Conly, F.M. et G. van der Kamp. 2001. « Monitoring the hydrology of Canadian prairie wetlands to detect the effects of climate change and land use changes ». J. Environ. Monit. Assess. 67: 195-215.

Gouvernement du Canada. 1991. La politique fédérale sur la conservation des terres humides. Approvisionnement et Services Canada. 14 p.

Groupe national de travail sur les terres humides (GNTTH). 1997. Système de classification des terres humides du Canada, 2e édition, B.G. Warner and C.D.A. Rubec (dir de publ.). Wetlands Research Centre, University of Waterloo, Waterloo. 68 p.

Groupe national de travail sur les terres humides (GNTTH). 1988. Terres humides du Canada. Environnement Canada et PolyScience Publications. 452 p.

Juliano, K. et S.P. Simonovic. 1999. « The impact of wetlands on flood control in the red River Valley of Manitoba. Final Report to the International Joint Commission ». Natural Resources Institute, Université de Manitoba, Winnipeg (Manitoba). 64 p.

Marsh, P. et M. Hey. 1994. « Analysis of spring high water events in the Mackenzie Delta and implications for lake and terrestrial flooding ». Geografiska Annaler 4: 221-234.

Marsh, P. et L. Lesack. 1996. « The hydrologic regime of perched lakes in the Mackenzie Delta: potential responses to climate change ». Limnol. Oceanogr. 41: 849-856.

Mortsch, L. 1998. « Assessing the impact of climate change on the Great Lakes shoreline wetlands ». Climatic Change 40: 391-416.

Price, J.S. et J.M. Waddington. 2000. « Advances in Canadian wetland hydrology and biogeochemistry ». Hydrolog. Process. 14: 1579-1589.

Prowse, T.D. et S. Beltaos. 2002. « Climatic control of river-ice hydrology: a review ». Hydrolog. Process. 16: 805-822.

Robinson, S.D. et T.R. Moore. 2000. « The influence of permafrost and fire upon carbon accumulation in high boreal peatlands, Northwest Territories, Canada ». Arctic, Antarctic Alpine Res. 32: 155-166.

Roulet, N.T. 2000. « Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto protocol: prospects and significance for Canada ». Wetlands 20: 605-615.

Rouse, W.R., E.M. Blyth, R.W. Crawford, J.R. Gyakum, J.R. Janowicz, B. Kochtubajda, H.G. Leighton, P. Marsh, L. Martz, A. Pietroniro, H. Ritchie, W.M. Schertzer, E.D. Soulis, R.E. Stewart, G.S. Strong et M.K. Woo. 2003. « Energy and water cycles in a high-latitude, north-flowing river system. Summary of results from the Mackenzie GEWEX study – Phase 1 ». Bull. Am. Met. Soc., janvier 2003, p. 73-87.

Rouse, W.R., M.S.V. Douglas, R.E. Hecky, A.E. Hershey, G.W. Kling, L. Lesack, P. Marsh, M. Mcdonald, B.J. Nicholson, N.T. Roulet et J.P. Smol. 1997. « Effects of climate change on the freshwaters of Arctic and Subarctic North America ». Hydrolog. Process. 11: 55-84.

van der Kamp, G., W.J. Stolte et R.G. Clark. 1999. « Drying out of small prairie wetlands after conversion of their catchments from cultivation to permanent brome grass ». Hydrolog. Sci. J. 44(3): 387-397.

Vitt, D.H., L.A. Halsey, I.E. Bauer et C. Campbell. 2000. « Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene ». Can. J. Earth Sci. 37: 683-693.

Vitt, D.H., L.A. Halsey et S.C. Zoltai. 1999. « The changing landscape of Canada's western boreal forest: the current dynamics of permafrost ». Can. J. Forest Res. 30: 283-287.

Watmough, M.D., D.W. Ingstrup, D.C. Duncan et H.J. Schinke. 2002. « Prairie habitat joint venture habitat monitoring program phase 1: recent habitat trends in NAWMP targeted landscapes ». Technical Report Series No. 391. Service canadien de la faune, Edmonton (Alberta). 93 p.

Winter, T.A. 2000. « The vulnerability of wetlands to climate change: a hydrologic landscape perspective ». J. Amer. Water Resour. Assoc. 36: 305-311.

Zhulidov, A.V., J.V. Headley, R.D. Robarts, A.M. Nikanorov et A.A. Ischenko. 1997. « Atlas of Russian wetlands: biogeography and metal concentrations ». Environnement Canada. 307 p.

Chapitre 14

VARIABILITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES – CRYOSPHÈRE

Ross D. Brown[1], Michael N. Demuth[2], Barry E. Goodison[1], Philip Marsh[3], Terry D. Prowse[4], Sharon L. Smith[2] et Ming-ko (Hok) Woo[5]

[1] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Dorval (Qc)

[2] Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada, Ottawa (Ont.)

[3] Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Saskatoon (Sask.)

[4] Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Victoria (C.-B.)

[5] Université McMaster, Département de géographie, Hamilton (Ont.)

La cryosphère (neige, glace, glaciers, gélisol/pergélisol) est l'une composantes les plus importantes de l'environnement canadien. Au Canada, la majeure partie du territoire est recouverte d'un manteau de neige plusieurs mois par année, pratiquement toutes les régions présentent un gélisol saisonnier et presque la moitié de la surface terrestre repose sur le pergélisol. En outre, la plupart des plans d'eau sont recouverts d'une couche de glace durant l'hiver. Finalement, les glaciers et la calotte glaciaire constituent le plus grand volume de glace d'origine terrestre de l'hémisphère Nord en dehors du Groenland. Les systèmes hydrologiques de la plupart des bassins canadiens comportent des changements de phase et des réserves saisonnières à long terme auxquels participent la cryosphère et des processus cryosphériques (Woo, 1996).

Les réactions de la cryosphère au réchauffement climatique (augmentation de la fraction des précipitations reçues sous la forme de chutes de pluie, diminution de la durée d'enneigement et d'englacement, disparition des glaciers de montagne, accroissement de l'épaisseur de la couche active, fonte de la glace de sol, etc.) auront d'importantes répercussions sur les cycles hydrologiques régionaux, plus particulièrement dans les environnements qui reposent sur le pergélisol (Woo et al., 1992; Woo, 1996; Rouse et al., 1997). Ces réactions et leur incidence sur les cycles hydrologiques et les réserves d'eau douce seront cependant difficiles à mesurer, car la cryosphère se caractérise non seulement par des interactions et des rétroactions complexes, mais aussi par des délais de réaction et des capacités de stockage variables. Les modèles de circulation générale (MCG) entièrement couplés actuellement utilisés comportent des lacunes : ils n'intègrent pas bon nombre des processus cryosphériques influant sur les zones terrestres ou montrent de sérieuses limitations quant à leur capacité de simuler les principales caractéristiques du climat des régions froides (Allison et al., 2001). Le présent chapitre a pour objet d'évaluer l'état actuel des connaissances sur la cryosphère et sur le rôle joué par celle-ci dans les systèmes hydrologiques du Canada; de décrire les réactions de la cryosphère au récent réchauffement climatique et leur incidence sur les eaux douces; de présenter un sommaire des principales lacunes au chapitre des connaissances et des besoins en matière de programmes.

Situation actuelle

Précipitations. Les modèles hydrologiques nécessitent une information précise (corrigée en fonction des erreurs systématiques [p. ex. Goodison et al ., 1998]) sur les quantités, les fréquences et les types de précipitations. Les précipitations d'hiver, particulièrement celles qui sont reçues sous forme de neige, ont toujours été difficiles à mesurer avec exactitude. Par ailleurs, les changements apportés aux méthodes d'observation, y compris l'automatisation et les réductions de la densité des réseaux d'observation, compromettent notre capacité de déterminer convenablement la variabilité spatiale et temporelle des précipitations d'hiver au pays. On a consenti des efforts pour produire des ensembles de données sur les précipitations à des points de grille (p. ex. Louie et al., 2002) applicables aux études hydrologiques, mais ces ensembles de données ne sont actuellement accessibles que pour des pas de temps mensuels. Des modèles opérationnels de prévisions météorologiques et des projets de vérification analytique ont aussi permis d'obtenir des ensembles de données sur les précipitations aux échelles spatiales et temporelles requises, mais l'exactitude de ces données est douteuse. En outre, le haut degré d'incertitude que présentent les prévisions des précipitations fournies par les modèles climatiques soulève des réserves semblables pour l'étude des réactions de la cryosphère et des processus hydrologiques au réchauffement planétaire.

Couverture de neige. Ce n'est qu'en ayant de l'information précise sur l'évolution spatiale et temporelle de la couverture de neige (étendue, épaisseur, équivalent en eau de la neige) que l'on pourra assurer une surveillance

des changements dans les régimes climatiques et hydrologiques. Cette information est nécessaire également pour répondre à un éventail de besoins opérationnels, dont les suivants : la surveillance des conditions de sécheresse; l'analyse du risque d'incendie de forêt; l'établissement de prévisions en matière d'inondation et d'écoulement; l'initialisation de modèles météorologiques et hydrologiques. Le Canada possède de vastes réseaux de mesure *in situ* de la hauteur de neige et de relevés d'enneigement, mais ces réseaux sont concentrés aux latitudes méridionales et aux faibles élévations et ont connu des réductions majeures pendant les années 1990 (Brown et al., 2000). Malgré ces limites, les données *in situ* constituent une précieuse banque de données, d'une part, dans le cadre de la surveillance du changement et de la variabilité climatiques à l'échelle régionale et, d'autre part, pour la validation des informations fournies par les systèmes de télédétection ainsi que les sorties des modèles climatiques, météorologiques et hydrologiques.

Il existe divers ensembles de données satellitaires permettant de cartographier la couverture de neige et l'équivalent en eau de la neige. Une fois par semaine, des cartes de l'équivalent en eau de la neige, produites à partir de données recueillies par le capteur hyperfréquences/imageur spécialisé (SSMI), sont fournies en temps quasi réel pour les provinces des Prairies canadiennes (Goodison et Walker, 1995) à une résolution de 25 kilomètres. La résolution passera à 10 kilomètres quand les données satellitaires de l'AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System) seront accessibles en 2003. La recherche visant à fournir des données satellitaires pour d'autres régions du Canada a été couronnée d'un certain succès (Goïta et al., 2003), mais les régions recouvertes de forêts denses, de montagnes et de toundra continuent de poser des problèmes.

Le glacier Bow, dans les Rocheuses en Alberta.

Un éventail de modèles d'équilibre énergétique plus ou moins perfectionnés est disponible pour la modélisation de l'accroissement et de l'ablation selon les saisons. La modélisation de la couverture de neige s'effectue au moyen de modèles monocouche (p. ex. CLASS – Verseghy, 1991) ou multicouche qui permettent d'intégrer des paramètres liés à l'évolution de la granulométrie des flocons de neige (p. ex. CROCUS – Brun et al., 1992). Les études de validation (p. ex. Slater et al., 2001) montrent que la modélisation des processus en jeu à la surface terrestre et de l'enneigement permettent de saisir les principales caractéristiques de la couverture de neige (durée, épaisseur et équivalent en eau) et du régime de fonte des neiges sur une base intra- et inter-annuelle dans des milieux ouverts recouverts d'herbages. Toutefois, la modélisation de la variabilité spatiale de la couverture de neige est plus difficile en raison de la nécessité de prendre en compte des facteurs tels que : le transport de la chasse-neige élevée et la sublimation; l'interception par le couvert forestier et les pertes; la paramétrisation requise pour le traitement des conditions inégales de neige. D'importants progrès ont été réalisés récemment dans la compréhension de ces facteurs à l'échelle des sites (Marsh, 1999; Woo et al., 2000). Cependant, plus de travail sera requis en vue d'intégrer les résultats obtenus aux systèmes de modélisation du climat et des processus en jeu à la surface terrestre et il faudra traiter des propriétés et des processus de surface à de plus grandes échelles spatiales (p. ex. de 10 à 100 kilomètres).

L'interaction de la neige et de la végétation revêt beaucoup d'importance pour les ressources hydriques (Greene et al., 1999). Ainsi, les agriculteurs des Prairies exploitent régulièrement les propriétés d'emprisonnement de la neige qu'offrent le chaume et les résidus de culture pour assurer la reconstitution des réserves d'eau du sol et la gestion des eaux de ruissellement (Steppuhn, 1981). Les méthodes de gestion forestière influent également sur le ruissellement (voir le chapitre 8). Récemment, la végétation s'est modifiée sous l'effet du climat, ce qui a eu une incidence sur les bilans hydriques et les régimes thermiques des sols. L'on s'attend d'ailleurs à ce que de tels changements se poursuivent dans l'avenir. Par exemple, on prévoit que, dans le nord du Canada, la transformation de la toundra en

toundra arbustive aura un effet sur la couverture de neige, qui deviendra plus épaisse et sera distribuée plus également, et sur les eaux de fonte, qui deviendront plus abondantes (Sturm et al., 2001; Liston et al., 2002). Il est cependant difficile de prévoir si cette transformation de la végétation se traduira par une variation annuelle des réserves d'eau.

Gélisol/pergélisol. Le gélisol joue un rôle important en matière d'hydrologie à cause de son incidence sur l'infiltration, le ruissellement ainsi que sur le stockage et l'écoulement des eaux souterraines. Il a aussi une influence indirecte sur le régime hydrique, eu égard à la profondeur de la rhizosphère (important pour la succession et la croissance des végétaux) et à la durée de la période de dégel (important pour l'évapotranspiration et l'assimilation de carbone). Dans les zones à gélisol saisonnier, les réserves d'eau seraient affectées par de possibles réductions de la pénétration et de la durée du gel en réponse au réchauffement climatique par le biais d'un accroissement du potentiel d'évapotranspiration et d'une modification du régime de ruissellement. Dans les environnements nordiques, le pergélisol prend une part importante dans l'équilibre eau/humidité (p. ex. régulation de la hauteur de la nappe phréatique) et dans le bilan énergétique de surface (p. ex. retardement du processus de ruissellement de eaux de fonte) (Marsh et Woo, 1984).

Dans le pergilisol, de grandes quantités d'eau sont emmagasinées sous la forme de glace de sol qui, au dégel, constitue un apport d'eau supplémentaire. Le réchauffement arctique devrait faire augmenter la durée du dégel et l'épaisseur de la couche de dégel superficielle (couche active). Il pourrait même faire disparaître le pergélisol à certains endroits (Kane et al., 1991; Anisimov et al., 1997). Cependant, certains facteurs locaux (neige, végétation, couche organique, proximité des plans d'eau) viennent compliquer la réaction thermique des sols (Smith et Riseborough, 1983). Les réductions de la profondeur de la neige d'hiver (observées dans la majeure partie du Canada durant la période postérieure à 1976) ont, par exemple, diminué l'isolation du sol, phénomène qui pourrait compenser l'effet des températures de l'air plus élevées durant l'hiver.

De vastes réseaux canadiens de surveillance de la température du sol et de la couche active ont permis d'élaborer une représentation cartographique de la température du sol, de la répartition du pergélisol et de l'état de la glace de sol (Smith et al., 2001a). Ces réseaux fournissent d'importantes données qui servent à valider les modèles de circulation générale, à modéliser la vulnérabilité du pergélisol (Smith et Burgess, 1998) ainsi qu'à cartographier les observations et à évaluer les répercussions. La télédétection offre également des possibilités pour la surveillance du gel/dégel des sols de surface et des changements dans la zone des eaux superficielles qui pourraient être associés à la formation de thermokarsts.

Les répercussions hydrologiques des changements dans les zones reposant sur le pergélisol sont résumées par Woo (1996); elles comprennent notamment : un accroissement de la capacité d'emmagasinement des eaux souterraines découlant de l'épaississement de la couche active; un abaissement du niveau de la nappe phréatique, un écoulement vertical et un potentiel d'évaporation accrus. Le tassement de terrain dû au dégel différentiel provoqué par des variations de la teneur en glace du sol peut créer une topographie thermokarstique et modifier la répartition des eaux superficielles et le comportement des écoulements. Ces changements peuvent modifier le régime de ruissellement (crête de ruissellement moins importante au printemps, augmentation du débit de base et de sa durée, etc.) et le comportement hydrologique des milieux humides nordiques (certains milieux humides peuvent s'égoutter et certains lacs peuvent prendre de l'expansion). Une étude des lacs thermokarstiques de la plaine Old Crow du Yukon, basée sur une surveillance par satellite, a révélé une tendance à l'assèchement depuis le début des années 1970 (Labrecque et Duguay, 2001). Dans d'autres zones du Nord-Ouest canadien, les lacs de régions affichant une forte teneur en glace de sol peuvent se vider de façon catastrophique (Mackay, 1992; Marais et Neumann, 2001) en raison de changements liés à l'équilibre hydrique des lacs, à l'épaisseur de la couche active ou à l'instabilité des berges. De possibles hausses régionales de l'écoulement des eaux souterraines provoquées par le dégel de la glace de sol pourraient compenser le phénomène d'évaporation accrue. Cependant, la qualité de l'eau pourrait être affectée par un échange accru entre les eaux superficielles et les eaux souterraines, ces dernières présentant une charge élevée de substances chimiques dissoutes (Michel et van Everdingen, 1994).

Des taliks peuvent se former sous une couche active qui ne gèlerait pas de nouveau complètement au cours de l'hiver, et des eaux souterraines peuvent être maintenues durant l'hiver (Hinzman et Kane, 1992). Cette situation pourrait élever les niveaux des cours d'eau durant l'hiver, augmenter la formation de glace et entraîner un risque accru d'inondation au moment de la débâcle (Woo et al., 1992). L'affaissement des berges le long des cours d'eau provoqué par le dégel du pergélisol riche en glace peut accroître l'envasement, ce qui peut provoquer l'endiguement des cours d'eau et d'éventuelles inondations en amont (Aylsworth et al., 2000).

Glaciers. Les glaciers et les champs de glace de la Cordillère sont une source importante d'eau douce (approvisionnement en eau potable, irrigation, utilisation industrielle, pêches et production d'hydroélectricité). D'importants effets hydrologiques et écosystémiques pourraient découler de la réduction ou de la perte de cet approvisionnement. L'écoulement des glaciers et de la

calotte glaciaire arctique est moins important pour les réserves d'eau, mais il contribue néanmoins à l'élévation du niveau de la mer et joue un rôle à l'égard de la stratification des éléments nutritifs dans la colonne d'eau en zone côtière et du régime local des glaces de mer. Hopkinson et Young (1998) ont déterminé que les glaciers alimentant la rivière Bow, près de Banff, contribuent dans une proportion de 13 % à l'écoulement d'été durant les années de faible débit et dans une proportion excédant 50 % durant les années de débit extrêmement faible. Les glaciers alimentant la rivière Bow affichent toutefois un retrait important, et il a été démontré (Moore et Demuth, 2001; Demuth et al., 2002b) que leur contribution en eau de fonte diminue. Cela soulève des inquiétudes quant à la pérennité des écoulements d'été dans cette région du Canada, surtout en raison des incertitudes concernant le volume de glace actuellement emmagasinée dans les glaciers.

Chaque année, des mesures du bilan massique sont effectuées à cinq sites de la Cordillère dans le cadre du programme national de glaciologie (Demuth, 1996). Des sites de surveillance sont choisis pour représenter les principales régions de réponse glacier-climat, mais le réseau présente plusieurs trouées importantes (Cogley et Adams, 1998; Demuth et Koerner, 2001). Ces mesures *in situ* historiques sont indispensables (validation des modèles et des algorithmes satellitaires), mais ce n'est qu'en leur ajoutant des données de télédétection et en ayant recours à des modélisations numériques que l'on pourra évaluer la réponse des glaciers au changement et à la variabilité climatiques. De récents progrès ont été réalisés dans l'application de la télédétection à la surveillance des glaciers (Cogley et al., 2001; Copland et al., 2002; Demuth et al., 2002a, soumis pour publication), et on a commencé à produire des données de base sur l'étendue géographique de certains glaciers des Rocheuses canadiennes, de la chaîne de Selkirk et de la Cordillère côtière du nord de la Colombie-Britannique (Sidjak et Wheate, 1999).

Récemment, des progrès ont été réalisés au chapitre de la modélisation des processus glacier-ruissellement en combinant des données de télédétection et des données recueillies *in situ* (Brugman et Pietroniro, 1995; Rott et al., 2000), mais ces processus se produisent sur des échelles non encore résolues par la plupart des modèles climatiques régionaux ou mondiaux. Pour étudier la réaction future des glaciers de la Cordillère au changement climatique, il faudra élaborer des méthodes permettant de réduire l'échelle des données de sortie des modèles climatiques au niveau des masses de glace individuelles. Qui plus est, il faudra améliorer la représentation de la couverture de glace dans les modèles hydrologiques distribués. Ce n'est par ailleurs qu'en comprenant mieux l'hydrologie glaciaire que l'on pourra se prémunir contre les risques que présentent les glaciers. Des débâcles glaciaires catastrophiques (appelées « jokulhlaups », mot islandais) provenant de sources supraglaciares, proglaciaires, intraglaciaires et sous-glaciaires peuvent se produire à haute altitude dans les montagnes, en particulier au cours des périodes de fonte rapide des glaciers. Il faudra aussi étudier la composante dynamique de la réaction des glaciers aux changements climatiques, puisque leur géométrie changeante influe sur le régime d'écoulement qui, en retour, influe sur l'évolution morphologique des glaciers. La modification du régime d'écoulement à l'intérieur des glaciers peut également modifier la nature des régimes d'écoulement sous-glaciaire et le ruissellement.

Évaporation/sublimation. La diminution de la couverture de neige attribuable à la sublimation de la chasse-neige élevée est considérable dans les régions exposées de la surface terrestre telles que les prairies et la toundra. Pomeroy et Gray (1995) ont estimé que, dans les prairies, les pertes par sublimation représentaient de15 à 41% des chutes de neige annuelles. Ils ont également estimé qu'environ le tiers du total de la neige tombant sur les sapins et les pins disparaissait dû à la sublimation qui se produit au niveau du couvert forestier. Un travail plus récent de modélisation (Dery et Yau, 2001) a montré que les taux calculés pour la sublimation de la chasse-neige élevée étaient extrêmement sensibles aux mesures d'assimilation de l'humidité et aux champs thermodynamiques en évolution dans la couche limite de l'atmosphère durant les événements de chasse-neige élevée. Une évaluation précise des pertes par sublimation à l'échelle des bassins permettra de compléter le bilan hydrique. Cependant, de grandes incertitudes subsistent relativement à la sublimation de la chasse-neige élevée, dont le seuil de la vitesse du vent, la distribution du nombre de densité et de la taille des particules au voisinage de la surface d'une zone de chasse-neige élevée (Xiao et Taylor, 2002). Des observations détaillées sont nécessaires pour atténuer ces incertitudes.

Comme il est mentionné dans d'autres sections, la cryosphère a une incidence importante sur l'évaporation de surface. Les réductions des manteaux glaciel et nival accompagnant le réchauffement climatique sont susceptibles d'être associées à une possibilité accrue de pertes par évaporation, ce qui pourrait avoir des répercussions importantes pour les lacs (chapitre 12), les milieux humides (chapitre 13) et les zones agricoles.

Glace en eaux douces. La durée et l'épaisseur du manteau glaciel influent considérablement sur l'évaporation, le débit des cours d'eau et des lacs, l'écologie et le risque d'inondation associé aux embâcles. D'éventuels changements associés à la climatologie des glaces (et à l'écoulement) pourraient avoir une incidence sur le transport dans les cours d'eau et sur chemins de glace. Récemment, Prowse (2001b, c) et Prowse et Beltaos (2002) ont étudié certains aspects biologiques et hydrologiques de la glace fluviale. Le processus de for-

mation des embâcles revêt une importance particulière au Canada, non seulement en raison du potentiel d'inondation et de dégâts matériels (chapitre 4) qu'il représente, mais également parce qu'il s'agit, dans les bassins fluviaux des régions froides, d'un processus naturel important intimement lié à l'écologie fluviale (Prowse et Culp, 2003) et à la pulsation des eaux douces dans le bassin arctique (p. ex. Lewis et al., 2000).

Le réchauffement projeté au Canada entraînera vraisemblablement une réduction du manteau glaciel et un allongement de la saison d'évaporation. Le manteau glaciel affecte également le climat local (p. ex. les chutes de neige due aux effets de lac), ce qui comprend la cryosphère marine dans le cas de la baie d'Hudson, où la glace marine a une influence importante sur les accumulations de neige dans l'une des principales régions productrices d'hydroélectricité du Québec. La formation et la disparition de la glace sont sensibles aux changements climatiques; Beltaos et Prowse (2001) ont constaté que l'incidence accrue de la fonte au milieu de l'hiver et des débâcles qui s'ensuivent dans des régions tempérées du Canada pourrait effectivement accroître la fréquence et la gravité des embâcles.

Une variété d'observations *in situ* de la glace de lacs et de cours d'eau ont été effectuées au Canada (voir le sommaire dans Brown et al., 2002). En général, les banques de données *in situ* renferment des données couvrant des périodes relativement courtes (peu de données avant 1950) et reflètent les réductions majeures que les réseaux d'observation ont subies pendant les années 1990. Les réseaux de mesure *in situ* canadiens ne sont plus adéquats comme source des données primaires requises pour la surveillance de la glace de lac. La télédétection offre une stratégie d'observation de rechange viable, mais les données satellitaires ne sont pas recueillies depuis assez longtemps pour documenter les changements et la variabilité climatiques. Il faudra donc élaborer des méthodes de regroupement des observations satellitaires et des données d'observation *in situ* disponibles pour créer des séries chronologiques uniformes et à long terme sur les processus inhérents au gel/dégel et à la couverture de glace observés dans les lacs. La surveillance périodique de la glace fluviale comporte davantage de difficultés, mais des données à haute résolution obtenues par le SAR (radar à ouverture synthétique) ont été utilisées avec succès dans le cadre d'essais expérimentaux (Pietroniro et Leconte, 2000).

Des progrès considérables ont été accomplis dans la capacité de modéliser la formation et la disparition de la glace de lac. Par ailleurs, des modèles thermodynamiques unidimensionnels de la glace de lac (p. ex. Ménard et al., 2002) ont pu reproduire la variabilité de la couverture de glace au moyen de données de forçage météorologiques locales. On a accompli des progrès semblables en modélisant l'incidence hydraulique de la couche de glace sur l'écoulement fluvial (Hicks et Healy, 2003) et sur la formation des embâcles (Beltaos, 1995). Une modification du processus de formation des embâcles et du risque d'inondation associé par la régulation de l'écoulement a été proposée et mise à l'essai sur le terrain en tant que stratégie d'adaptation au phénomène d'assèchement résultant des changements climatiques (Prowse 2001a; Prowse et al., 2002b).

Réactions de la cryosphère au récent réchauffement climatique

Glaciers. Il y a des indications multiples d'un retrait important de petits glaciers alpestres et continentaux en réaction au réchauffement du 20^{e} siècle (Dyurgerov et Meier, 1997; Cogley et Adams, 1998). Demuth et Keller (2002) ont fait état d'une accélération récente du retrait des glaciers de la Cordillère méridionale du Canada, ce qui concorde avec les tendances enregistrées dans le reste du monde. En outre, Demuth et al. (2002b) ont décrit un retrait considérable des glaciers émissaires et du manteau glaciel sur les pentes orientales des Rocheuses depuis les sommets enregistrés durant la période néo-glaciaire (ca. 1850). Ces diminutions de l'étendue géographique du manteau glaciel pendant le 20^{e} siècle sont accompagnées de diminutions correspondantes de leur contribution aux volumes d'écoulement d'été vers l'aval dans les Prairies de l'Ouest, ce qui vient aggraver l'effet des conditions de sécheresse qui règnent dans cette région du Canada en raison de la diminution des réserves d'eau emmagasinées dans les réservoirs d'irrigation aménagés sur les principaux cours d'eau.

Certains estiment que l'écoulement glaciaire peut augmenter de façon provisoire quand de vastes régions recouvertes de glace d'origine terrestre (p. ex. champs de glace Columbia) sont sujettes à des conditions de fonte persistantes (Demuth et al., 2002c). Cependant, il est difficile de prévoir le moment, la durée et l'importance de cette contribution accrue des glaciers au ruissellement en raison, d'une part, d'incertitudes liées à la façon dont les régimes de température et de précipitations peuvent changer à de plus hautes altitudes et, d'autre part, de la composante dynamique de la réponse des glaciers. Il est également possible qu'il se produise des changements majeurs dans les lignes de partage des eaux ainsi que dans les bassins alimentés par les eaux de fonte des grands champs de glace.

En outre, le bilan massique des glaciers de la Cordillère est fortement influencé par les fluctuations de la circulation atmosphérique, notamment celles attribuables à l'Oscillation décennale du Pacifique (PDO) et à la téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord (Moore et Demuth, 2001 Demuth et Keller, 2002). Recueillir des données sur la vulnérabilité des glaciers aux fluctuations atmosphériques est d'une grande importance, puisque la

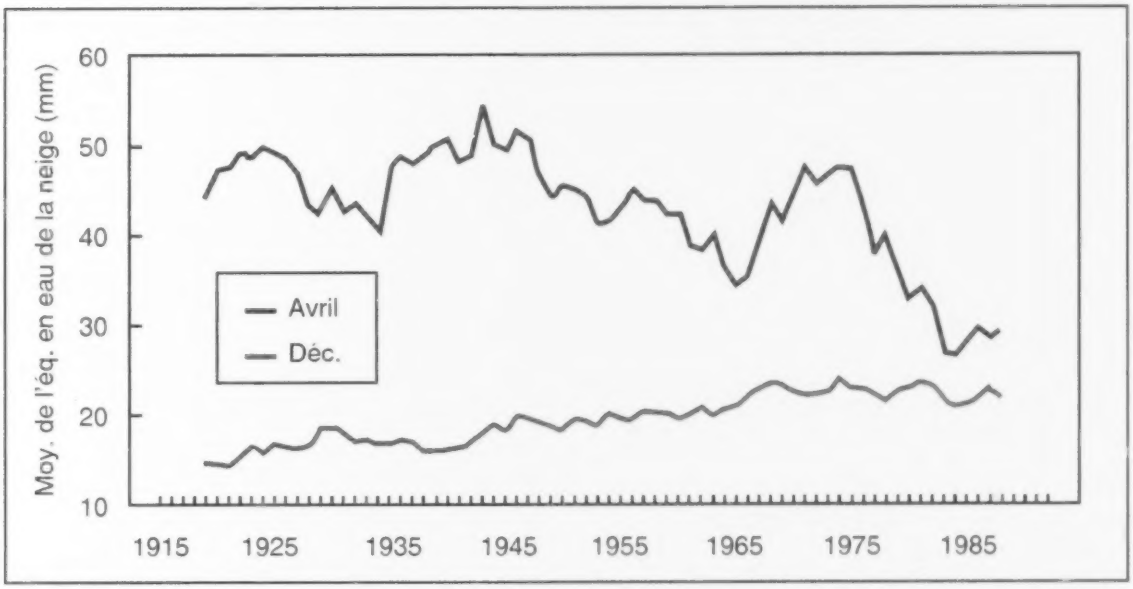


Figure 1. Variation historique de l'équivalent en eau de la neige pour décembre et avril dans les régions tempérées de l'Amérique du Nord. Source : Brown (2000).

réaction est superposée aux changements climatiques attribuables aux gaz à effet de serre et que certains modes de variabilité atmosphérique peuvent être plus persistants sous un climat plus chaud (IPCC, 2001).

Couverture de neige (équivalent en eau de la neige, épaisseur, durée). L'analyse de données d'observation *in situ* sur l'épaisseur de la couverture de neige a montré que la période postérieure aux années 1970 a été caractérisée par des réductions significatives de l'épaisseur de la neige tant durant l'hiver qu'au printemps (fonte plus hâtive) dans la majeure partie du pays et dans l'Ouest canadien en particulier (Brown et Braaten, 1998). Cette observation a été confirmée par des données satellitaires obtenues au début des années 1970 qui montraient de grandes réductions de l'épaisseur de la couverture de neige au printemps dans l'Ouest canadien et dans l'Arctique. Les données satellitaires montrent que celle-ci subit peu de changements importants au début de la saison hivernale, bien que les données d'observation *in situ* obtenues au début du présent siècle commencent à montrer certains indices d'un retard du début de la saison hivernale. Brown (2000) a enregistré des tendances opposées pas mal semblables pour ce qui est de l'équivalent en eau de la neige estimé aux latitudes tempérées de l'Amérique du Nord. Ainsi, la période hivernale affiche d'importantes augmentations des valeurs de l'équivalent en eau au cours des années 1915-1992 en réaction aux précipitations croissantes, tandis que la période printanière affiche d'importantes diminutions durant les mêmes années (figure 1). Cette réaction saisonnière opposée cadre avec les observations de Groisman et al. (1994) selon lesquelles la couverture de neige exercerait, durant la période printanière, la rétroaction la plus forte sur le bilan radiatif de la Terre.

La réaction du manteau de neige en montagne à un climat changeant est un souci important dans l'Ouest canadien, où l'écoulement des eaux de fonte est essentielle pour la réalimentation des réservoirs. Moore et McKendry (1996) ont montré que les conditions d'enneigement dans le sud de la Colombie-Britannique ont été dominées par des comportements de circulation atmosphérique associés aux fluctuations décennales de la température à la surface de la mer. Ils ont également trouvé des indices d'un changement brusque vers des accumulations de neige moins importantes en hiver après 1976, ce qui a coïncidé avec une transition bien reconnue de la téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord vers des valeurs plus positives (Leathers et Palecki, 1992). Ce changement a été associé à la réduction de l'épaisseur de la couverture de neige, au ruissellement plus hâtif et à un bilan massique négatif des glaciers dans la plupart des régions de l'ouest de l'Amérique du Nord. Brown (1998) a démontré que le phénomène El Niño–Oscillation australe était responsable d'anomalies significatives de la couverture de neige à l'échelle régionale dans l'Ouest canadien, El Niño étant associé à une étendue de la couverture de neige inférieure à la moyenne durant l'hiver et La Niña, à des équivalents en eau supérieurs à la moyenne. De brusques transitions de la circulation atmosphérique, comme celle de 1976 qui a coïncidé avec la téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord, et une récente tendance vers de plus fréquents événements attribuables à El Niño, ajoutent aux incertitudes liées à la réaction de la couverture de neige à l'échelle régionale au réchauffement climatique planétaire.

Glace en eaux douces. Magnuson et al. (2000) ont rapporté une tendance hémisphérique voulant que les débâcles dans les cours d'eau surviennent de manière

plus hâtive, ce qui est compatible avec la réaction généralisée de la cryosphère au réchauffement du 20e siècle (IPCC, 2001). Au Canada, les données disponibles sur le gel et les débâcles dans les cours d'eau et les lacs semblent indiquer que cette tendance est plus complexe à l'échelle régionale. Zhang et al. (2001) ont analysé un sous-ensemble de données recueillies dans 249 stations du Réseau hydrométrique de référence, ce qui leur a permis d'inférer des données sur des tendances associées au gel et aux débâcles dans les cours d'eau du Canada pendant la période 1947-1996. Les résultats ont montré une différence intéressante entre les cours d'eau de l'Ouest canadien et de ceux des Maritimes, les premiers affichant une tendance vers une débâcle plus hâtive et les seconds, vers une débâcle plus tardive. Ces fluctuations ont été associées à la réponse au réchauffement saisonnier (isotherme 0 °C) et à certains régimes de circulation atmosphérique (Bonsal et Prowse, 2003; Bonsal et al., 2001; Prowse et al., 200a). March et al. (2002) ont enregistré une tendance semblable vers des débâcles plus hâtives sur le fleuve Mackenzie près de son embouchure, mais ils n'ont pas dégagé de tendances quant à l'ampleur de ces débâcles. D'autres données attestant de différences régionales importantes dans le gel et le dégel des lacs ont été fournies par Duguay et al. (2002).

Pergélisol et gélisol. Young et Woo (2002) soutiennent qu'il est très difficile d'établir une distinction entre la réaction gel-dégel du gélisol à la variabilité climatique interdécennale et une tendance climatique. Les analyses récentes (IPCC, 2001) ont indiqué que le pergélisol se réchauffe dans beaucoup de régions de la planète; cependant, la surveillance du pergélisol peu profond a seulement commencé de manière sérieuse au cours des dernières décennies. Au Canada, il a été démontré que le début, l'ampleur et le rythme du réchauffement varient d'une région à l'autre en fonction des différents climats et effets régionaux liés aux propriétés de la couverture de neige et de la surface terrestre. Par exemple, le delta du Mackenzie et les régions de l'Extrême-Artique montrent des signes d'un réchauffement récent du pergélisol (Romanovsky et al., 2002), tandis que les régions du nord-est et du nord-ouest du Canada montrent des signes d'un refroidissement récent du pergélisol (Allard et al., 1995; Burn, 1998). Il y a également des indications d'une pénétration accrue du dégel dans le delta du Mackenzie. De fortes hausses ont été associées au réchauffement extrême survenu pendant l'été 1998. Aux sites présentant des sols riches en glace, la pénétration accrue du dégel a été accompagnée d'une importante subsidence du sol et, par conséquent, de faibles changements dans l'épaisseur de la couche active (Smith et al., 2001b; Wolfe et al., 2000). Beilman et al. (2001) ont récemment observé la fonte du pergélisol dans le nord des provinces des Prairies.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

Besoins en matière de données et de surveillance

- L'emploi de modèles climatiques et hydrologiques nécessite des données sur les précipitations à des points de grille à haute résolution (~10 km) qui sont représentatives à l'échelle spatiale et mesurées à intervalle de 6 heures (ou moins). Il faudrait corriger les erreurs systématiques dans les ensembles de données d'observation sur les précipitations et déployer des efforts concertés pour comprendre les effets de l'automatisation (p. ex. intercomparaisons entre les mesures manuelles et les mesures automatiques dans des conditions opérationnelles).
- Il faut des ensembles de données cryosphériques fiables (équivalent en eau de la neige, couverture de neige, etc.) pour documenter les changements et la variabilité climatiques. Ces données sont également requises pour alimenter et valider les modèles. Il faudra combiner des données d'observation *in situ*, des données satellitaires et de données dérivées de modèles, puis appliquer des méthodes d'assimilation des données. On a un besoin urgent d'ensembles de données précises couvrant un éventail d'échelles spatiales pour l'élaboration et la validation de méthodes de mise à l'échelle.
- Une approche systématique s'impose pour déterminer la quantité d'eau emmagasinée dans les glaciers de la Cordillère et la vitesse de la fonte. Cette approche exigera : une surveillance satellitaire de l'étendue géographique pour les réévaluations décennales de l'étendue des glaciers; l'élaboration de méthodes de mise à l'échelle ascendante et descendante pour l'exécution de simulations régionales du bilan massique (validées par des données obtenues sur le terrain ou par télédétection); un examen systématique (à intervalle approximatif de cinq ans) réalisé au moyen d'un laser aéroporté afin de détecter les changements d'élévation. Enfin, il faut numériser les données historiques que contient l'Inventaire canadien des glaciers afin que l'on puisse documenter la réaction des glaciers au climat au cours des 40 à 50 dernières années (Munro, 2000).
- Il importe de mener des recherches fondamentales pour comprendre, d'une part, les corrélations/rétroactions entre les systèmes hydrologiques/cryosphériques et fournir, d'autre part, des évaluations fiables des fluctuations de l'apport d'eau en réaction aux changements climatiques. Le plan de mise en œuvre du projet du Programme mondial de recherches sur le climat (PMRC) – Cryosphère (CliC) propose l'élaboration de campagnes de terrain dans un certain nombre de sites clés. Ce projet vise à améliorer la connaissance des processus et des interactions en jeu dans

les régions froides ainsi qu'à établir les paramétrisations des principaux processus cryosphériques (sublimation; interactions neige-végétation; rôle du gélisol dans l'infiltration et l'écoulement) pour les modèles climat-hydrologie couplés. Le concept de sites clés peut également être employé pour valider les informations fournies par les systèmes de télédétection, évaluer des systèmes de mesure et étudier les problèmes touchant les mises à l'échelle.

Besoins en matière de modélisation

- On a besoin d'intercomparaisons contrôlées entre les modèles climat-hydrologie couplés et des ensembles de données de haute qualité sur les bassins canadiens. Il faudra consentir des efforts importants pour établir les champs des propriétés de surface et des mécanismes de forçage.
- Il importe de mieux comprendre l'incidence que pourrait avoir sur le bilan hydrique un écoulement accru des eaux souterraines à l'échelle régionale en raison de la fonte de la glace de sol, puis déterminer la distribution future du pergélisol dans des conditions de réchauffement climatique. On a aussi besoin de mieux comprendre comment établir des réseaux d'écoulement plus cohérents dans les tourbières et les milieux humides en réaction au dégel. Cette connaissance facilitera la détermination des voies d'écoulement des eaux ainsi que des futures sources et des futurs puits de carbone (chapitre 13).
- Il faut acquérir de nouvelles connaissances sur les processus cryosphériques tels que l'infiltration du gélisol afin de les intégrer aux modèles climat-hydrologie couplés canadiens (Woo et al., 2000).
- On a besoin des résultats de modèles climatiques et hydrologiques quant aux conditions climatiques actuelles et futures pour tester notre capacité de modéliser la cryosphère nordique et tenir compte des changements à venir (p. ex, étude Mackenzie GEWEX – MAGS).
- Il faut, pour déterminer la réaction future des glaciers aux changements climatiques, utiliser des méthodes et des approches nouvelles pour produire des scénarios climatiques réalistes propres aux régions montagneuses (p. ex., mises à l'échelle statistiques descendantes et modèles climatiques régionaux emboîtés). Pour satisfaire à ce besoin, il faut aussi un nouveau type de modèle glaciaire qui peut aussi bien comprendre des limites de résistance d'ordre supérieur pour l'étude des écoulements qui se produisent dans des régions de topographie complexe qu'être utilisé à une échelle régionale.

Autres questions

- Le Canada perd ses spécialistes de la cryosphère et de l'hydrologie. Il faut offrir de meilleures possibilités de formation pratique et des incitatifs aux jeunes scientifiques afin de les intéresser à l'étude de la neige et de la glace.
- Un soutien logistique chancelant des activités de recherches sur le Nord mine la capacité du Canada au chapitre des recherches scientifiques fondamentales sur le climat et les systèmes hydrologiques en région nordique. Cette situation contribue à la perte d'expertise de terrain décrite précédemment.

Remerciements

Les auteurs sont très reconnaissants pour les précieux commentaires fournis par les réviseurs externes suivants : Wayne Rouse (Université McMaster), Martin Sharp (Université de l'Alberta) et Fred Wrona (Institut national de recherche sur les eaux [INRE]).

Références

Allard, M., B.L. Wang et J.A. Pilon. 1995. « Recent cooling along the southern shore of Hudson Strait, Quebec, Canada, documented from permafrost temperature measurements ». Arctic Alpine Res. 27: 157-166.

Allison, I., R.G. Barry et B.E. Goodison (s. la dir. de). 2001. « Climate and Cryosphere (CliC) project science and co-ordination plan, Version 1 », janvier 2001, WCRP-114, WMO/TD No. 1053. 96 p.

Anisimov O.A., N.I. Shiklomanov et F.E. Nelson. 1997. « Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models ». Global and Planetary Change 15: 61-78.

Aylsworth, J.M., A. Duk-Rodkin, T. Robertson et J.A. Traynor. 2000. « Landslides of the Mackenzie valley and adjacent mountainous and coastal regions », p. 167-176. *Dans* L.D. Dyke et G.R. Brooks (s. la dir. de), « The physical environment of the Mackenzie Valley, Northwest Territories: a base line for the assessment of environmental change ». Commission géologique du Canada, Bulletin 547.

Beilman, D.W., D.H. Vitt et L.A. Halsey. 2001. « Localized permafrost peatlands in western Canada: definition, distributions, and degradation ». Arctic, Antarctic and Alpine Research 33: 70-77.

Beltaos, S. (s. la dir. de). 1995. « River ice jams. Water Resources Publications », Highlands Ranch, Co., États-Unis.

Beltaos, S. et T.D. Prowse. 2001. « Climate impacts on extreme ice-jam events in Canadian rivers ». Hydrolog. Sci. J. 46: 157-181.

Bonsal, B.R. et T.D. Prowse. 2003. « Trends and variability in spring and autumn 0°C-isotherm dates over Canada ». Climatic Change. Sous presse.

Bonsal, B.R., T.D. Prowse et M.P. Lacroix. 2001. « Linkages between spring 0°C isotherm dates and hydrocryospheric variables over Arctic Canada », p. 75. *Dans* « Proceedings, International Symposium on Arctic Feedbacks to Global Change », octobre 25-27, 2001, Rovaniemi, Finlande.

Brown, R.D. 1998. « El Niño and North American snow cover », p. 165-172. *Dans* « Proc. 55th Eastern Snow Conference », Jackson, N.H., juin 4-6, 1998.

Brown, R.D. 2000. « Northern Hemisphere snow cover variability and change, 1915-1997 ». J. Climate 13: 2339-2355.

Brown, R.D. et R.O. Braaten. 1998. « Spatial and temporal variability of Canadian monthly snow depths, 1946-1995 ». Atmos.-Ocean 36: 37-45.

Brown, R.D., C.R. Duguay, B.E. Goodison, T.D. Prowse, B. Ramsay et A.E. Walker. 2002. « Freshwater ice monitoring in Canada - an assessment of Canadian contributions for global climate monitoring », p. 368-376. *Dans* « Proc. 16th IAHR International Symposium on Ice », Dunedin, Nouvelle-Zélande, décembre 2-6, 2002, Vol. 1.

Brown, R.D., A. Walker et B.E. Goodison. 2000. « Seasonal snow cover monitoring in Canada - an assessment of Canadian contributions for global climate monitoring », p. 131-141. *Dans* « Proc. 57th Eastern Snow Conference », Syracuse, N.Y., mai 17-19, 2000.

Brugman, M.M. et A. Pietroniro. 1995. « Application of SAR and LANDSAT to modelling glacier runoff: preliminary results from the Illecillewaet Glacier test basin », p. 241-257. *Dans* « Applications of remote sensing in hydrology, Proceedings of the 2nd International Workshop, National Hydrology Research Institute Symposium 14 ».

Brun, E., P. David, M. Sudul et G. Brunot. 1992. « A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting ». J. Glaciol. 38: 13-22.

Burn, C.R. 1998. « Field investigations of permafrost and climatic change in northwest North America », p. 107-120. *Dans* A.G. Lewkowicz et M. Allard (s. la dir. de), « Permafrost Seventh International Conference Proceedings », Collection Nordicana No. 57.

Cogley, J.G. et W.P. Adams. 1998. « Mass balance of glaciers other than the ice sheets ». J. Glaciology 44: 315-325.

Cogley, J.G., M.A. Ecclestone et D.T. Anderson. 2001. « Melting on glaciers: environmental controls examined with orbital radar ». Hydrolog. Process. 15: 3541-3558.

Copland, L., M. Sharp et J. Dowdeswell. 2002. « The distribution and flow characteristics of surge-type glaciers in the Canadian High Arctic ». Annals of Glaciology 36: 73-81.

Demuth, M.N. 1996. « The Canadian glacier variations monitoring and assessment network: status and future perspectives », p. 37-51. *Dans* R.S. Williams, Jr. et J.G. Ferrigno (s. la dir. de), « Proceedings of the Workshop on Long-term Monitoring of Glacier Fluctuations in North America and Northwestern Europe », Tacoma, États-Unis, septembre 11-13, 1996. United States Geological Survey 98-31 Open-File Report.

Demuth, M.N., C. Hopkinson, M. Sitar, A. Pietroniro et L. Chasmer. 2002a. « Airborne scanning LASER terrain mapping of Peyto Glacier, Wapta and Waputik Icefields, Canada: first results and future prospects ». Commission géologique du Canada « Open File ».

Demuth, M.N. et R. Keller. 2002. « An assessment of the mass balance of Peyto Glacier (1966-1995) and its relation to recent and past-century climatic variability », p. 83-132. *Dans* M.N. Demuth, D.S. Munro et G.J. Young (s. la dir. de), « Peyto Glacier: one century of science. National Hydrology Research Institute Science Report #8 ».

Demuth, M. et R. Koerner. 2001. « Canadian glacier/ice cap-climate observing system: current status and future perspectives. Summary Report of the Glacier/Ice Cap Working Group, GCOS Monitoring Networks Workshop », Ottawa, Canada, 2000-January 28-29, Programme national de glaciologie, Commission géologique du Canada, Ottawa (Ont.).

Demuth, M.N., A. Pietroniro et T.B.M.J. Ouarda. 2002b. « Streamflow regime shifts resulting from recent glacier fluctuations in the eastern slopes of the Canadian Rocky Mountains, p. 35. Abstract Proceedings, Canadian Water Resources Association Annual Conference », Winnipeg, Canada.

Demuth, M.N., A. Pietroniro, T. Ouarda et J. Yetter. 2002c. « The impact of climate change on the glaciers of the Canadian Rocky Mountain eastern slopes and implications for water resource adaptation in the Canadian prairies - Phase I ». Commission géologique du Canada « Open File 4322 ».

Dery, S.J. et M.K. Yau. 2001. « Simulation of blowing snow in the Canadian Arctic using a double-moment model ». Boundary-Layer Meteorology 99: 297-316.

Duguay, C.R., F. Lenormand, R.D. Brown et T.D. Prowse. 2002. « Historical trends in lake ice cover in northern Canada ». *Dans* « Proc. 16th IAHR International Symposium on Ice », Dunedin, Nouvelle-Zélande, décembre 2-6, 2002.

Dyurgerov, M. et M. Meier. 1997. « Mass balance of mountain and sub-polar glaciers: a new global assessment for 1961-1990 ». Arctic Alpine Res. 29: 392-401.

Goïta, K., A.E. Walker et B.E. Goodison. 2003. « Algorithm development for the estimation of snow water equivalent in the boreal forest using passive microwave data ». Int. J. Remote Sensing 24: 1097-1102.

Goodison, B.E., P.Y.T. Louie et D. Yang. 1998. « WMO solid precipitation measurement intercomparison. WMO Instruments and Observing Methods Report No. 67, WMO/TD No. 872 ».

Goodison, B.E. et A.E. Walker. 1995. « Canadian development and use of snow cover information from passive microwave satellite data », p. 245-262. *Dans* « Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions », Utrecht, Pays-Bas.

Greene, E.M., G.E. Liston et R.A. Pielke. 1999. « Relationships between landscape, snowcover depletion, and regional weather and climate ». Hydrolog. Process. 13: 2453-2466.

Groisman, P.Ya, T.R. Karl et R.W. Knight. 1994. « Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures ». Science 263: 198-200.

Hicks, F. et D. Healy. 2003. « Determining winter discharge by hydraulic modeling ». Can. J. Civil Eng. 30: 101-112.

Hinzman, L.D. et D.L. Kane. 1992. « Potential response of an arctic watershed during a period of global warming ». J. Geophys. Res. 97(D3): 2811-2820.

Hopkinson, C. et G.J. Young. 1998. « The effect of glacier wastage on the flow of the Bow River at Banff, Alberta, 1951-1993 ». Hydrolog. Process. 12: 1745-1763.

IPCC. 2001. « Climate change 2001 - the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) », J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden et D. Xiaosu (s. la dir. de). Cambridge University Press, Royaume-Uni. 944 p.

Kane, D.L., L.D. Hinzman et J.P. Zarling. 1991. « Thermal response of the active layer to climatic warming in a permafrost environment ». Cold Regions Sci. Technol. 19: 111-122.

Labrecque, S. et C.R. Duguay. 2001. Étude de la dynamique spatio-temporelle récente des lacs thermokarstiques de la plaine Old Crow Flats, Yukon, par télédétection, p. 585-590. *Dans* Proc. 23rd Canadian Symp. on Remote Sensing – 10e Congrès de l'Association québécoise de télédétection.

Leathers, D.J. et M.A. Palecki. 1992. « The Pacific/North American teleconnection pattern and United States climate. Part II: temporal characteristics and index specification ». J. Climate 5: 707-716.

Lewis, E.L., E.P. Jones, P. Lemke, T.D. Prowse et P. Wadhams (s. la dir. de). 2000. « The freshwater budget of the Arctic Ocean ». Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 623 p.

Liston, G.E., J.P. McFadden, M. Sturm et R.A. Pielke. 2002. « Modelled changes in arctic tundra snow, energy and moisture fluxes due to increased shrubs ». Global Change Biol. 8: 17-32.

Louie, P.Y.T., W.D. Hogg, M.D. MacKay, X. Zhang et R.F. Hopkinson. 2002. « The water balance climatology of the Mackenzie basin with reference to the 1994/95 water year ». Atmos.-Ocean 40: 159-180.

Mackay, J.R. 1992. « Lake stability in an ice-rich permafrost environment: examples from the western Arctic coast », p. 1-26. *Dans* R.D. Robarts et M.L. Bothwell (s. la dir. de), « Aquatic ecosystems in semi-arid regions: implications for resource management. NHRI Symposium Series 7 », Environnement Canada, Saskatoon (Saskatchewan).

Magnuson, J.J., D.M. Robertson, B.J. Benson, R.H. Wynne, D.M. Livingstone, T. Arai, R.A. Assel, R.G. Barry, V. Card, E. Kuusisto, N.G. Granin, T.D. Prowse, K.M. Stewart et V.S. Vuglinski. 2000. « Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere ». Science 289: 1743-1746.

Marsh, P. 1999. « Snowcover formation and melt: recent advances and future prospects ». Hydrolog. Process. 13: 2519-2536.

Marsh, P. et N. Neumann. 2001. « Processes controlling the rapid drainage of two ice-rich permafrost-dammed lakes in NW Canada ». Hydrolog. Process. 15: 3433-3446.

Marsh, P., C. Onclin et N. Neumann. 2002. « Water and energy fluxes in the lower Mackenzie Valley, 1994/95 ». Atmos.-Ocean 40: 245-256.

Marsh, P. et M. Woo. 1984. « Wetting front advance and freezing of meltwater within a snow cover. 1. Observations in the Canadian Arctic ». Water Resour. Res. 20: 1853-1864.

Ménard, P., C.R. Duguay, G.M. Flato et W.R. Rouse. 2002. « Simulation of ice phenology on Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada ». Hydrolog. Process. 16: 3691-3706.

Michel, F.A. et R.O. van Everdingen. 1994. « Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic change ». Permafrost and Periglacial Processes 5: 191-195.

Moore, R.D. et M.N. Demuth. 2001. « Mass balance and streamflow variability at Place Glacier, Canada, in relation to recent climate fluctuations ». Hydrolog. Process. 15: 3473-3486.

Moore, R.D. et I.G. McKendry. 1996. « Spring snowpack anomaly patterns and winter climatic variability, British Columbia, Canada ». Water Resour. Res. 32: 623-632.

Munro, D.S. 2000. « Progress in glacier hydrology: a Canadian perspective ». Hydrolog. Process. 14: 1627-1640.

Pietroniro, A. et R. Leconte. 2000. « A review of Canadian remote sensing applications in hydrology, 1995-1999 ». Hydrolog. Process. 14: 1641-1666.

Pomeroy, J.W. et D.M. Gray. 1995. « Snowcover - accumulation, relocation and management. National Hydrology Research Institute Science Report No. 7 », Saskatoon, Canada. 144 p.

Prowse, T.D. 2001a. « An adaptation strategy for mitigating the combined effects of climate variability and flow regulation on a major river delta. European Geophysical Society, 26th General Assembly, Geophysical Research Abstracts », Vol. 3.

Prowse, T.D. 2001b. « River-ice ecology: I: hydrologic, geomorphic and water-quality aspects ». J. Cold Regions Eng. 15: 1-16.

Prowse, T.D. 2001c. « River ice ecology. II: biological aspect ». J. Cold Regions Eng. 15: 17-33.

Prowse, T.D. et S. Beltaos. 2002. « Climatic control of river-ice hydrology: a review ». Hydrolog. Process. 16: 805-822.

Prowse, T.D., B.R. Bonsal, M.P. Lacroix et S. Beltaos. 2002a. « River-ice breakup in northern Canada: trends and atmospheric linkages ». *Dans* « Proc. 16th IAHR International Symposium on Ice », Dunedin, Nouvelle-Zélande, décembre 2-6, 2002. Sous presse.

Prowse, T.D. et J.M. Culp. 2003. « Ice breakup: a neglected factor in river ecology ». Can. J. Civil Eng. 30: 128-144.

Prowse, T.D., D. Peters, S. Beltaos, A. Pietroniro, L. Romolo, J. Töyrä et R. Leconte. 2002b. « Restoring ice-jam floodwater to a drying delta ecosystem ». Water Int. 27: 58-69.

Romanovsky, V., M. Burgess, S. Smith, K. Yoshikawa et J. Brown. 2002. « Permafrost temperature records: indicators of climate change ». EOS, Transactions American Geophysical Union 83(589): 593-594.

Rott, H. et al. 2000. « Hydrology of alpine and high latitude basins, final report. Mitteilung Nr. 4 Institute for Meteorology and Geophysics, University of Innsbruck » 201 p.

Rouse, W.R., M. Douglas, R. Hecky, G. Kling, L. Lesack, P. Marsh, M. MacDonald, B. Nicholson, N. Roulet et J. Smol. 1997. « Effects of climate change on freshwaters of arctic and subarctic North America ». Hydrolog. Process. 11: 873-902.

Sidjak, R.W. et R.D. Wheate. 1999. « Glacier mapping of the Illecillewaet Icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data ». Int. J. Remote Sensing 20: 273-284.

Slater, A.G. et al. 2001. « The representation of snow in land surface schemes: results from PILPS 2(D) ». J. Hydrometeorology 2: 7-25.

Smith, S.L. et M.M. Burgess. 1998. « Mapping the response of permafrost in Canada to climate warming », p. 163-171. *Dans* « Current research 1998-E », Commission géologique du Canada.

Smith, S.L., M.M. Burgess et J.A. Heginbottom. 2001a. « Permafrost in Canada, a challenge to northern development », p. 241-264. *Dans* G.R. Brooks (s. la dir. de), « A synthesis of geological hazards in Canada ». Commission géologique du Canada, Bulletin 548.

Smith, S.L., M.M. Burgess et F.M. Nixon. 2001b. « Response of active-layer and permafrost temperatures to warming during 1998 in the Mackenzie Delta, Northwest Territories and at Canadian Forces Station Alert and Baker Lake, Nunavut ». Commission géologique du Canada, « Current Research 2001-E5 ». 8 p.

Smith, M.W. et D.W. Riseborough. 1983. « Permafrost sensitivity of climatic change », Vol. 1, p. 1178-1183. *Dans* « Proceedings of 4th International Conference on Permafrost », Fairbanks, Alaska, National Academy Press, Washington, D.C.

Steppuhn, H. 1981. « Snow and agriculture », p. 60-126. *Dans* D.M. Gray et D.H. Male (s. la dir. de), « Handbook of snow, principles, processes, management and use ». Pergamon, Toronto.

Sturm, M., J.P. McFadden, G.E. Liston, F.S. Chapin, C.H. Racine et J. Holmgren. 2001. « Snow-shrub interactions in Arctic tundra: a hypothesis with climatic implications ». J. Climate 14: 336-344.

Verseghy, D. 1991. « CLASS - a Canadian land surface scheme for GCMs. I: soil model ». Int. J. Climatol. 11: 111-133.

Wolfe, S.A., E. Kotler et F.M. Nixon. 2000. « Recent warming impacts in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, and northern Yukon Territory coastal areas », Vol. 9, p. 53. *Dans* « Geological Survey of Canada, Current Research 52 2000-B1 ».

Woo, M.-k. 1996. « Hydrology of northern North America under global warming », p. 73-86. *Dans* J.A.A. Jones, C. Liu, M.-k. Woo et H.-t. Kung (s. la dir. de), « Regional hydrological response to climate change ». Kluwer Academic Publishers.

Woo, M.-k., A.G. Lewkowicz et W.R. Rouse. 1992. « Response of the Canadian permafrost environment to climatic change ». Phys. Geog. 13: 287-317.

Woo, M.-k., P. Marsh et J.W. Pomeroy. 2000. « Snow, frozen soils and permafrost hydrology in Canada, 1995-1998 ». Hydrolog. Process. 14: 1591-1611.

Young, K.L. et M.K. Woo. 2002. « Thermo-hydrological responses to an exceptionally warm, dry summer in a High Arctic environment ». Nordic Hydrology. Sous presse.

Xiao, J.B. et P.A. Taylor. 2002. « On equilibrium profiles of suspended particles ». Boundary-Layer Meteorology 105: 471-482.

Zhang, X., K.D. Harvey, W.D. Hogg et T.R. Yuzyk. 2001. « Trends in Canadian streamflow ». Water Resour. Res. 37: 987-998.

Chapter 15

MENACES INTÉGRÉES ET CUMULATIVES POUR LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU

Stewart J. Cohen[1], Rob de Loë[2], Alan Hamlet[3], Ross Herrington[4], Linda D. Mortsch[5] et Dan Shrubsole[6]

[1] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Groupe de recherche sur les impacts et l'adaptation, Université de la Colombie-Britannique, Vancouver (C.-B.)

[2] Université de Guelph, Département de géographie, Guelph (Ont.)

[3] Université de Washington, Département de génie civil et de l'environnement, Seattle (Wash.)

[4] Environnement Canada, Région des Prairies et du Nord, Regina (Sask.)

[5] Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Groupe de recherche sur les impacts et l'adaptation, Université de Waterloo, Waterloo (Ont.)

[6] Université Western Ontario, Département de géographie, London (Ont.)

Introduction

Les institutions qui ont orienté la mise en valeur des ressources en eau du Canada ont été multiples et ont évolué de façon à s'adapter à des conditions humaines et biophysiques différentes et changeantes. Les Canadiens ont cherché des moyens de favoriser le développement en assurant des réserves additionnelles d'eau, en réduisant la variabilité des débits des cours d'eau ainsi qu'en redirigeant et en utilisant les eaux souterraines. Ce n'est que récemment qu'on a cherché à réduire les besoins en eau de façon concertée. L'aménagement des cours d'eau a souvent entraîné des conséquences et des problèmes qui n'avaient pas été prévus, dont certains sont décrits dans les chapitres précédents. Compte tenu que tout ce qui touche l'eau est interrelié en raison du cycle hydrologique, il est parfois difficile de gérer un des usages de l'eau sans influer de manière significative sur un autre usage. Nombre des problèmes liés aux ressources hydriques peuvent être qualifiés de pernicieux ou de méta-problèmes parce qu'ils ne sont pas du ressort d'un seul organisme ou échelon gouvernemental et impliquent de façon importante des changements, de l'incertitude ainsi que des situations complexes et conflictuelles (Mitchell, 2002). Les différences d'opinion au sujet des objectifs à atteindre ainsi que l'incertitude et les désaccords que suscitent les solutions qui doivent être apportées aux méta-problèmes sont courants. Les problèmes peuvent être chroniques ou aigus et impliquer des considérations d'ordre technique, économique, juridique, politique ou social. Les solutions proposées auront plusieurs facettes; par conséquent, l'information nécessaire à la prise de décisions éclairées devra tenir compte des utilisations humaines et des aspects biophysiques de l'eau et des ressources connexes.

Les *menaces intégrées* et cumulatives pour la disponibilité de l'eau sont des types de méta-problèmes. Les menaces intégrées surgissent en présence d'une combinaison de facteurs de stress (p. ex. problèmes reliés à l'utilisation combinée des eaux de surface et souterraines, changements climatiques et démographiques prévus et variations connexes de la demande en eau, changements simultanés dans les utilisations de l'eau, etc.). Les *menaces cumulatives* sont des effets qui s'accumulent avec le temps. Ces effets apparaissent lentement et évoluent sur de longues périodes. La résolution de tels problèmes exige généralement la participation de divers organismes, peut-être de tous les échelons de gouvernement, du secteur privé, des utilisateurs/clients, des organismes non gouvernementaux pertinents et du grand public. En outre, le processus pour la résolution de problèmes peut également évoluer au fil des ans, plutôt qu'être préétabli dès le début. Les changements climatiques constituent un bon exemple d'une menace cumulative potentielle.

Certains aspects précis de ces méta-problèmes ont été traités dans les chapitres précédents, qui ont fait ressortir l'incertitude, la complexité, les conflits et les changements liés aux défis touchant la quantité des ressources en eau. Plutôt que de revoir tous les aspects du problème, le présent chapitre se concentre sur les deux éléments suivants :

1. Une description de la façon dont les menaces intégrées et cumulatives pour la disponibilité en eau peuvent se développer. Le cas du bassin du fleuve Columbia montre comment les décisions prises par des organismes gouvernementaux qui ont un mandat relativement limité et qui agissent indépendamment les uns des autres ont contribué à la création d'un méta-problème et à son aggravation.

2. Des exemples d'organismes qui ont instauré des mécanismes favorisant des approches globales en matière de gestion de l'eau. Ces exemples témoignent des tentatives qui sont faites actuellement pour résoudre les méta-problèmes. Chaque organisme s'appuie sur la meilleure information disponible pour prendre des décisions éclairées et collabore avec les autres organismes, les pouvoirs publics, les parties intéressées et le public.

Situation actuelle – Expériences récentes en gestion des menaces intégrées et cumulatives

Les plans de gestion des menaces futures varieront d'une instance à l'autre et à l'intérieur de chacune d'elles ainsi qu'à l'intérieur de chaque bassin hydrographique. La planification relative au bassin, les études sur la gestion de l'eau souterraine et les méthodes d'évaluation des impacts peuvent faciliter la prise des décisions. Au Canada, la gestion des ressources naturelles, dont l'eau, incombe principalement aux gouvernements provinciaux. Le gouvernement fédéral a des responsabilités plus limitées, mais néanmoins importantes, dans des domaines comme la pêche, la navigation, les terres fédérales et les questions transfrontalières. Le gouvernement fédéral, les provinces et les municipalités peuvent recueillir de l'information sur les ressources naturelles et la diffuser au public. Les organismes liés aux ressources en eau peuvent réglementer ou autoriser les utilisations de l'eau et imposer des droits d'utilisation.

Tous les pouvoirs publics ont établi des méthodes pour s'assurer que l'intérêt public est bien servi; il n'existe toutefois pas de mesure de gestion « unique » et parfaite qui permettrait d'aborder et de résoudre les problèmes intégrés et cumulatifs. Il peut être difficile d'identifier un organisme de gestion central pour chaque grand bassin hydrographique qui pourrait réagir efficacement aux menaces cumulatives (p. ex. effets de la mondialisation, changements climatiques, progrès/risques technologiques). Pour relever de tels défis, il faut que les nombreux groupes d'intérêt (p. ex. hydroélectricité, irrigation, lutte contre les inondations, écosystèmes aquatiques, pêches, navigation, utilisations municipales/domestiques/industrielles) et les pouvoirs publics déploient des efforts concertés.

Programme de la ville de Guelph sur l'utilisation de l'eau à l'extérieur, niveau 2 (rouge).

Les exemples d'approches intégrées à la gestion de l'eau traduisent la capacité des mesures institutionnelles de s'attaquer aux menaces intégrées et cumulatives. Nous lui présentons une vue d'ensemble des problèmes touchant les ressources en eau dans le bassin du fleuve Columbia et se poursuit par une description des approches intégrées de la Régie des eaux des provinces des Prairies et de la Charte des Grands Lacs.

Exemple d'une menace intégrée et cumulative – le bassin du fleuve Columbia

Une étude de cas de l'aménagement du bassin du fleuve Columbia et les mesures prises au plan institutionnel pour régler divers problèmes illustrent bien l'importance de l'évolution d'une menace cumulative et les obstacles majeurs qu'il faut surmonter pour circonscrire les problèmes à des fins de planification, d'évaluation des impacts et d'intervention. Le figure 1 montre comment le problème s'est étendu depuis la ratification du Traité du fleuve Columbia (TFC) en 1964. Ce traité a mené à la construction d'un système de réservoirs comprenant plusieurs barrages aux États-Unis et au Canada (p. ex. Keenleyside, Duncan, Mica, Libby, etc.). Le système visait à régler les problèmes transfrontaliers liés à la production d'hydroélectricité en hiver et à l'atténuation des inondations. Suite à la construction de quatre nouveaux réservoirs de retenue autorisés par le TFC et du barrage Dworshak[1] (1973) aux États-Unis, le débit régulé du fleuve Columbia a été modifié considérablement. Malgré les énormes répercussions écologiques de la modification du régime d'écoulement, les considérations écologiques ne faisaient pas partie de la définition institutionnelle du problème à l'époque, et le TFC n'établit aucun mécanisme binational officiel de coordination pour le maintien du débit qui puisse satisfaire les besoins de l'écosystème.

L'achèvement du barrage Libby en 1976 a marqué la fin de la période de construction des gros barrages sur le Columbia aux termes du TFC[2] ainsi que le début d'une sensibilisation accrue aux impacts du développement et de la prise de mesures par les pouvoirs publics. Les répercussions sur la pêche du saumon ont peut-être été les plus importantes. Si la pêche commerciale, les obstacles au passage des saumons et la destruction de l'habitat avaient grandement affecté les stocks de saumon du

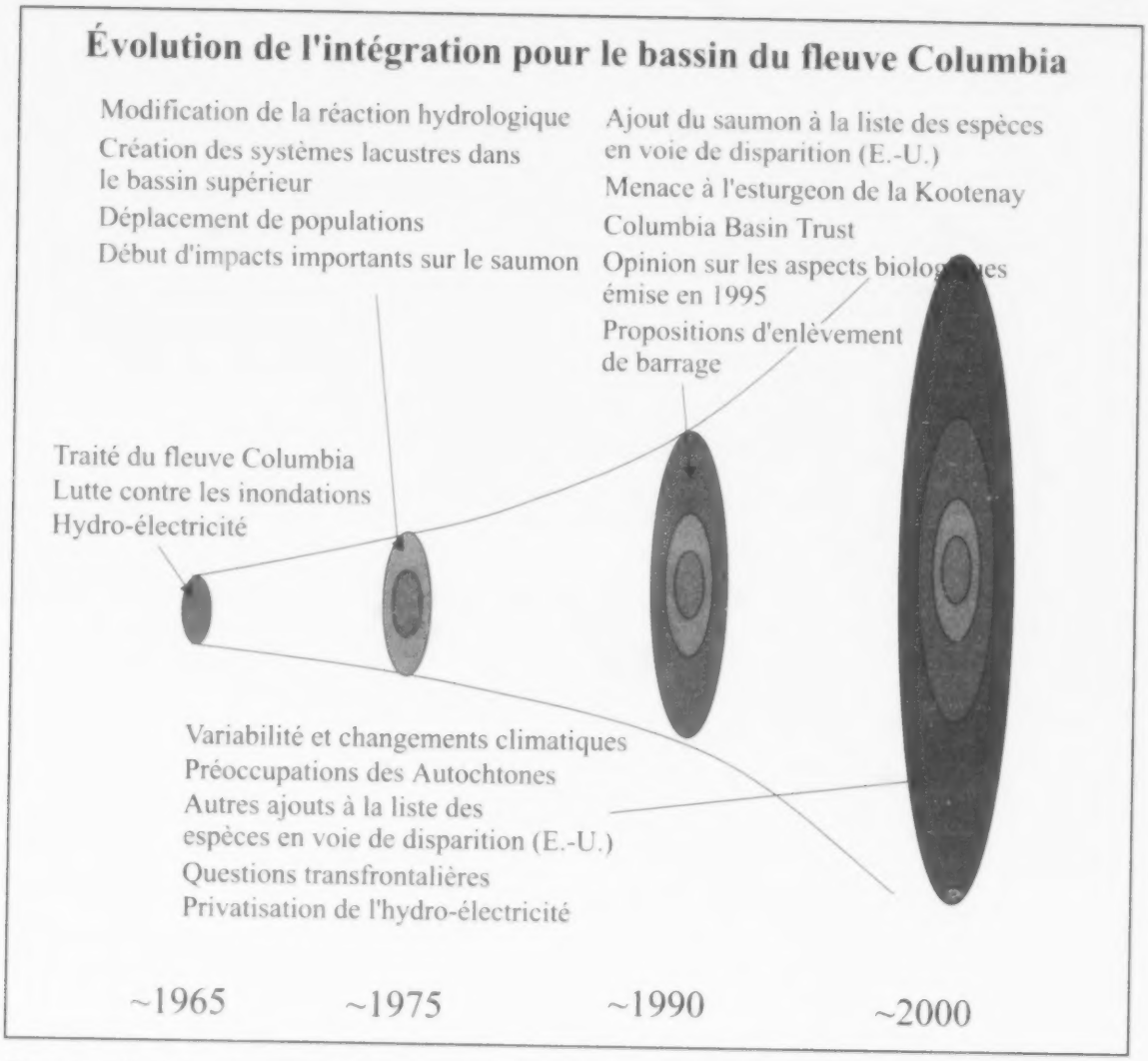


Figure 1. Défi posé par l'expansion des problèmes de gestion de l'eau : évolution des enjeux de gestion du bassin du Columbia de 1965 à nos jours.

Columbia avant le Traité, la construction des barrages aux termes du Traité et les faibles taux de survie en mer entre 1977 et 1995 ont rapidement créé une situation critique à laquelle les pouvoirs publics ont réagi. Aux États-Unis, la *Northwest Power Planning and Conservation Act* (1980) a stipulé l'égalité du saumon et de la production hydroélectrique dans le Columbia dans la législation américaine, et on a créé le Northwest Power Planning Council afin d'établir un meilleur équilibre entre l'exploitation du réservoir à des fins de production hydroélectrique et les populations de poissons. Malgré cette loi et une panoplie de solutions « techniques » (p. ex. nombre accru de stations d'alevinage et transport par barge des alevins jusqu'à l'océan pour éviter les problèmes d'habitat en eau douce), aucune modification significative n'a été apportée aux politiques d'exploitation du réservoir du Columbia jusqu'à ce que plusieurs stocks de saumon soient mentionnés dans l'*Endangered Species Act* (ESA) à la fin des années 1980. Le National Marine Fisheries Service (NMFS) a alors été dans l'obligation d'intervenir, ce qui a entraîné des modifications significatives des politiques d'exploitation du réservoir du Columbia en 1995 (National Marine Fisheries Service, 1995), puis en 2000 (National Marine Fisheries Service, 2000).

Dans les années 1990, les limites institutionnelles des problèmes ont été élargies considérablement et les éléments suivants ont été pris en considération :

- protection d'autres espèces de saumon dans le bassin inférieur et désignation de l'esturgeon de la rivière Kootenay (Kootenai) en vertu de l'ESA;
- protection et remise en état de l'habitat riverain et des cours d'eau;
- surveillance accrue et gestion de la température de l'eau et de teneur en gaz;

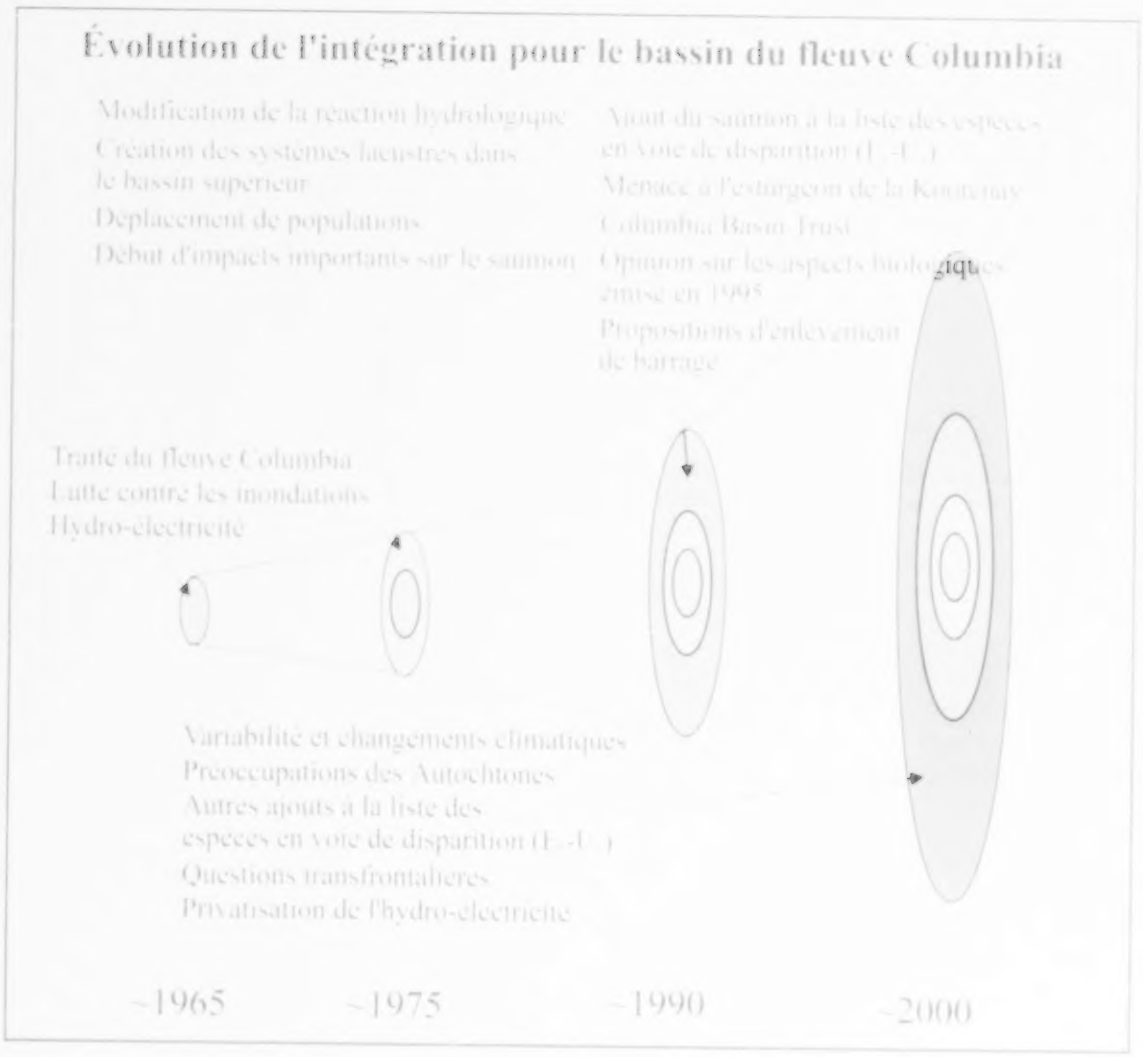


Figure 1. Défi posé par l'organisation des politiques de gestion de l'eau : exemple des progrès de gestion du fleuve Columbia de 1965 à nos jours.

Columbia avant le Traité, la construction des barrages aux termes du Traité et les faibles taux de survie en mer entre 1977 et 1995 ont rapidement créé une situation critique à laquelle les pouvoirs publics ont réagi. Aux États-Unis, la *Northwest Power Planning and Conservation Act* (1980) a stipulé l'égalité du saumon et de la production hydroélectrique dans le Columbia dans la législation américaine, et on a créé le Northwest Power Planning Council afin d'établir un meilleur équilibre entre l'exploitation du réservoir à des fins de production hydroélectrique et les populations de poissons. Malgré cette loi et une panoplie de solutions « techniques » (p. ex. nombre accru de stations d'alevinage et transport par barge des alevins jusqu'à l'océan pour éviter les problèmes d'habitat en eau douce), aucune modification significative n'a été apportée aux politiques d'exploitation du réservoir du Columbia jusqu'à ce que plusieurs stocks de saumon soient mentionnés dans l'*Endangered Species Act* (ESA) à la fin des années 1980. Le National Marine Fisheries Service (NMFS) a alors été dans l'obligation d'intervenir, ce qui a entraîné des modifications significatives des politiques d'exploitation du réservoir du Columbia en 1995 (National Marine Fisheries Service, 1995), puis en 2000 (National Marine Fisheries Service, 2000).

Dans les années 1990, les limites institutionnelles des problèmes ont été élargies considérablement et les événements suivants ont été pris en considération :

- protection d'autres espèces de saumon dans le bassin inférieur et désignation de l'esturgeon de la rivière Kootenay (Kootenai en vertu de l'ESA);
- protection et remise en état de l'habitat riverain et des cours d'eau;
- surveillance accrue et gestion de la température de l'eau et de la teneur en gaz.

- protection accrue des écosystèmes lacustres dans le bassin supérieur (en contradiction avec les exigences américaines relatives aux utilisations non consommatrices);
- indemnisation des personnes déplacées ou affectées par suite de la construction de barrages (p. ex. le Columbia Basin Trust);
- enlèvement proposé de quatre gros barrages au fil de l'eau dans la rivière Snake inférieure;
- impacts de la variabilité et des changements climatiques;
- modifications proposées à la loi sur les ressources hydriques et au système d'attribution de l'eau à des fins d'irrigation (p. ex. les banques et les marchés d'eau);
- changements des politiques énergétiques régionales et internationales (p. ex. déréglementation des marchés de l'énergie).

La plupart des points ci-dessus sont apparus hors des limites institutionnelles des problèmes relativement étroites qui existaient il y a moins d'une décennie (Bankes, 1996; Volkman, 1997; O'Neil, 1997; Miller, 2000; Cohen et al., 2000). C'est pourquoi les gestionnaires et les décideurs de part et d'autre de la frontière sont appelés à gérer les ressources en eau du Columbia de façon plus globale et de prendre en considération des facteurs écologiques, économiques, politiques et culturels, ce dont ne tiennent pas compte les mesures institutionnelles existantes.

Exemple d'un approche intégrée : la Charte des Grands Lacs

Les Grands Lacs constituent un grand système d'eau douce qui est toutefois bien délimité, et seule une petite proportion de l'eau est renouvelée chaque année. Une consommation accrue ou de nouveaux usages de l'eau, comme pour l'irrigation, les procédés industriels et la fabrication, les exportations (transferts d'eau en vrac et ventes d'eau embouteillée) ainsi que les dérivations (en direction et à l'extérieur du bassin des Grands Lacs à des fins de navigation, d'approvisionnement en eau des villes et d'auto-épuration, de production hydroélectrique) peuvent avoir des répercussions néfastes sur la durabilité des ressources hydriques dans la région des Grands Lacs. Par le passé, les conflits et les controverses ont porté sur l'utilisation et la dérivation de l'eau des Grands Lacs, particulièrement à Chicago où la Cour suprême des États-Unis est intervenue à plusieurs occasions sur des questions liées à la qualité de l'eau, à la navigation, à l'accroissement de la demande domestique et industrielle ainsi qu'à la dérivation des cours d'eau pour lutter contre la sécheresse dans d'autres régions. Les changements climatiques pourraient aggraver ces problèmes (Changnon et Glantz, 1996).

En 1983, le Conseil des gouverneurs des Grands Lacs a créé un groupe de travail et l'a chargé d'établir un cadre institutionnel pour régir les dérivations de l'eau des Grands Lacs; ce cadre à mené, en 1985, à la Charte des Grands Lacs. La Charte s'appuie sur l'intention initiale du Traité des eaux limitrophes de 1909, qui est de préserver les niveaux et les débits des Grands Lacs. Elle reconnaît également que les eaux des Grands Lacs sont reliées entre elles et font partie d'un même système hydrologique non délimité par des frontières politiques, et que les multiples utilisations des ressources hydriques, le maintien de l'habitat et l'équilibre de l'écosystème sont interdépendants. La gestion des ressources en eau obéit à cinq principes : l'intégrité du bassin des Grands Lacs, la coopération entre les gouvernements, la protection des ressources en eau des Grands Lacs, la notification et la consultation préalables, et les programmes coopératifs. Même si la Charte est une directive à caractère non obligatoire qui ne lie pas ses signataires, elle oriente, par le consensus et la collaboration, les activités des huit États et des deux provinces des Grands Lacs (Saunders, 2000). Mais surtout, il faut que toute nouvelle utilisation ou consommation importante ou accrue de l'eau du bassin des Grands Lacs fasse préalablement l'objet de la notification, de la consultation et de l'accord de toutes les parties touchées. Comme le stipule la Charte : « les États et les provinces signataires ont l'intention de faire en sorte que les dérivations des eaux du Bassin ne soient pas permises si, individuellement ou cumulativement, elles devaient avoir des effets défavorables appréciables sur les niveaux de l'eau des lacs, les utilisations des eaux à l'intérieur du Bassin ou l'écosystème des Grands Lacs » (Conseil des gouverneurs des Grands Lacs, 1985).

Reconnaissant que la mise en œuvre des mesures qui visent à protéger les ressources en eau des Grands Lacs incombera aux signataires, la Charte mentionne que les huit États et les deux provinces appliqueront des lois établissant des programmes de gestion et de réglementation des dérivations et de la consommation des eaux. L'Ontario est un exemple de gouvernement qui s'est engagé dans cette voie. Selon l'*Ontario Water Taking and Transfer Regulation* (Ontario Regulation 285/99), qui a été pris en vertu de la *Loi sur les ressources en eau de l'Ontario* (Lois refondues de l'Ontario de 1990, chapitre O.40), les décisions relatives aux permis de prélèvement d'eau doivent être conformes aux obligations de l'Ontario en vertu de la Charte des Grands Lacs (Règlement de l'Ontario 285/99, article 4).

Le projet de pipeline entre les Grands Lacs et la municipalité régionale de Waterloo pourrait fournir une occasion d'appliquer la Charte des Grands Lacs. La croissance urbaine exerce une pression sur les ressources en eau des sous-régions (bassin de la rivière Grand). Depuis plusieurs décennies, les réserves disponibles ont été mises à l'épreuve. La municipalité régionale de Waterloo, dont 80 % de l'alimentation en eau provient de la nappe souterraine, envisage la construction d'un

pipeline jusqu'à l'un des Grands Lacs d'ici 2035. En raison des faibles niveaux d'eau dus aux sécheresses qui ont sévi de 1997 à 1999, en 2001 et en 2002, les restrictions à la consommation d'eau ont été imposées dans les zones urbaines et des conflits ont surgi dans les régions qui ont beaucoup recours à l'irrigation. La qualité de l'eau est menacée par l'agriculture, les rejets d'eaux usées traitées ainsi que les activités industrielles et commerciales (Grand River Conservation Authority, 1998). L'établissement de plans locaux de protection des têtes de puits et de l'aquifère est devenu une priorité pour la rivière Grand, et la municipalité régionale de Waterloo a montré la voie compte tenu de son expérience acquise lors de la contamination à la diméthylnitrosamine de l'approvisionnement en eau du village d'Elmira en1989 (Neufeld, 2000). Si un pipeline est construit, et selon le lac touché, ce projet pourrait être considéré comme un transfert entre bassins et aller à l'encontre des buts visés par le Traité des eaux limitrophes, qui est de préserver les niveaux d'eau et les débits. Si d'autres collectivités du bassin ou des collectivités voisines avaient des projets semblables, les effets cumulatifs sur certaines activités économiques, sociales et écologiques pourraient être considérables.

Une entente additionnelle à la Charte des Grands Lacs a été signée en 2001. Elle réaffirme les dispositions de la Charte, mais engage les États et les provinces des Grands Lacs à préparer un accord obligatoire touchant l'ensemble du bassin, à établir une norme décisionnelle en vue de l'examen des projets, à favoriser la participation du public et à définir des mécanismes de prise des décisions et de résolution des différends (Conseil des gouverneurs des Grands Lacs, 2001). De tels mécanismes pourraient prévenir d'éventuels problèmes liés aux transferts entre bassins et favoriser une répartition efficace et équitable des ressources entre les utilisations non consommatrices et les prélèvements d'eau. L'élaboration de mécanismes et de procédures permettant de maintenir un bon équilibre entre les intérêts et les besoins locaux et ceux de l'ensemble du bassin est un thème émergent pour ce qui est des menaces cumulatives et intégrées.

La Charte est un exemple novateur de coopération entre les pays, mais il y a des problèmes au niveau infranational (Saunders, 2000). En vue de la mise en oeuvre de la Charte, les signataires ont convenu de recueillir des données communes sur l'utilisation et la gestion de l'eau, de favoriser l'échange de données, de créer un Comité de gestion des ressources en eau, de mettre sur pied un programme de gestion des ressources en eau du bassin des Grands Lacs et de coordonner les recherches. Certains aspects n'ont pas été entièrement mis en oeuvre (Commission mixte internationale, 2000). Les lacunes dans les données recueillies sur l'utilisation de l'eau rendent difficile une comptabilisation précise. Le seuil de déclenchement de la procédure de notification des projets de dérivation ou de consommation d'eau (plus de 19 millions de litres par jour pendant 30 jours) est élevé; des projets de plus petite envergure peuvent avoir des impacts cumulatifs mais ne sont pas visés. Les parties touchées doivent être avisées et consultées au sujet des dérivations proposées, mais elles n'ont aucun droit de veto à l'égard des projets.

Exemple d'une approche intégrée : la Régie des eaux des provinces des Prairies

Les eaux de ruissellement qui s'écoulent sur le versant oriental des Rocheuses sont la principale source d'alimentation des grandes rivières du sud des provinces des Prairies, qui coulent vers l'est et traversent l'Alberta, la Saskatchewan et le Manitoba, puis se jettent dans la baie d'Hudson. Certains cours d'eau prennent naissance à l'extérieur des Prairies, à la ligne de partage des eaux, comme les collines Cypress. Ils peuvent également couler vers l'est et franchir des frontières provinciales avant de se jeter dans des rivières plus grandes ou de former des lacs fermés. La propriété des eaux d'un réseau hydrographique qui traversent deux territoires ou plus régis par des autorités différentes peut susciter de nombreux problèmes administratifs ou liés à l'utilisation de l'eau.

En 1948, les gouvernements de la Saskatchewan, de l'Alberta, du Manitoba et du Canada ont créé la Régie des eaux des provinces des Prairies qui est chargée de régir l'exploitation et le partage des eaux interprovinciales.

En 1969, les quatre gouvernements ont conclu l'Accord cadre sur la répartition. Cette entente propose une formule d'attribution des cours d'eau interprovinciaux qui coulent vers l'est, tient compte du problème de la qualité de l'eau et réétablit la Régie qui veille à l'exécution de l'Accord. L'Accord cadre a été modifié en 1984, lorsqu'on a précisé les dispositions relatives à la répartition des eaux des ruisseaux Battle, Lodge et Middle, qui sont des cours d'eau internationaux et interprovinciaux, en 1992, avec l'ajout d'une entente sur la qualité de l'eau et, en 1999, lorsque les lacs interprovinciaux ont été définis comme des cours d'eau en vertu de l'Accord cadre.

L'Accord cadre se fonde sur le principe du partage équitable de l'eau disponible dans les Prairies. De façon générale, la formule permet à chaque province de prendre la moitié de l'écoulement naturel provenant de l'intérieur de ses frontières et la moitié provenant de l'extérieur. En gros, l'écoulement naturel correspond à la quantité d'eau qui coulerait dans un cours d'eau si celui-ci n'avait jamais été perturbé par l'activité humaine. L'Accord cadre permet également de comparer la qualité de l'eau aux frontières interprovinciales à des niveaux acceptables et favorise une approche coopérative en vue de la mise en valeur et de la gestion intégrées des cours d'eau et des aquifères interprovinciaux de façon à garantir leur durabilité au profit des habitants des provinces des Prairies.

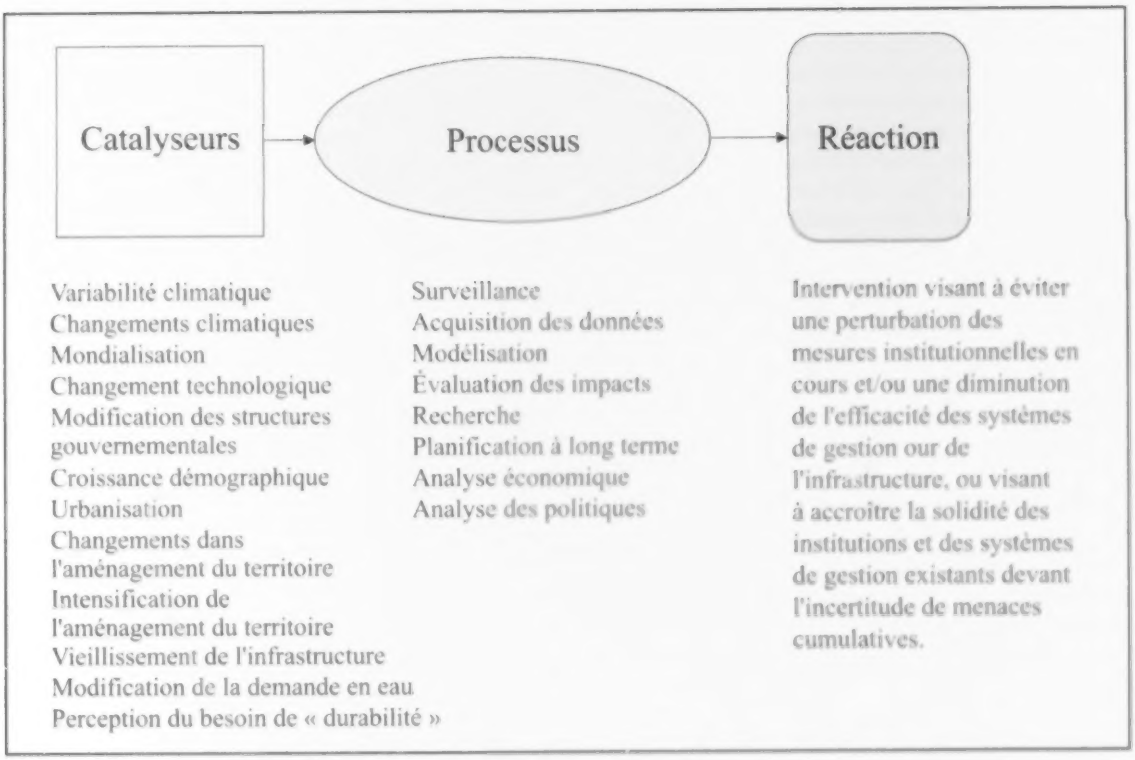


Figure 2. Cadre d'évaluation et de résolution des menaces cumulatives pour la disponibilité de l'eau.

Un secrétariat se charge du travail quotidien de la Régie à son bureau de Regina. Composé de membres du personnel d'Environnement Canada, il examine et analyse les données de surveillance, calcule le débit naturel aux frontières, détermine la conformité aux objectifs en matière de qualité de l'eau et présente des rapports sur la répartition et la qualité de l'eau aux frontières interprovinciales. La comprend trois comités permanents sur l'hydrométrie, la qualité de l'eau et l'eau souterraine qui participent au travail technique et conseillent la Régie.

Environnement Canada s'acquitte des fonctions de surveillance décrites dans l'Accord cadre et fournit des données provenant de 75 stations de surveillance hydrométrique à long terme, 16 stations météorologiques et 12 stations de surveillance de la qualité de l'eau. D'autres organismes fournissent de l'information provenant de 13 autres stations hydrométriques. Cette information sert à calculer les débits naturels et à rapporter les valeurs de paramètres de la qualité de l'eau.

Les valeurs calculées pour 14 stations hydrométriques et celles rapportées pour 12 stations de surveillance de la qualité de l'eau le long de la frontière entre l'Alberta et la Saskatchewan et de la frontière entre la Saskatchewan et le Manitoba sont utilisées par la Régie pour déterminer si les conditions de l'Accord cadre sont respectées. Même si l'Accord cadre s'applique à tous les cours d'eau interprovinciaux qui coulent vers l'est, les calculs officiels de répartition sont faits uniquement pour les cours d'eau où l'utilisation de l'eau est significative.

Depuis sa signature, l'Accord cadre sur la répartition a permis de protéger et de partager équitablement les cours d'eau interprovinciaux et a favorisé l'établissement d'un mécanisme de concertation pour prévenir les problèmes liés aux eaux souterraines et aux eaux de surface interprovinciales. Grâce à cette approche concertée adoptée par la Régie, les gouvernements provinciaux, qui sont les principaux organes de réglementation de l'approvisionnement en eau, ont toujours pu respecter les conditions de l'Accord cadre. Ce dernier pourrait donc servir de modèle à suivre en matière de gestion des questions intergouvernementales.

Tendances de la gestion, de la planification et de la recherche

Si, à l'origine, on dépendait exclusivement de la gestion de l'offre (p. ex. élargissement d'un réservoir), la tendance récente lorsque l'approvisionnement est rare semble consister à mettre davantage l'accent sur la gestion de la demande (p. ex. installation de compteurs, tarification, campagnes d'information). En ce qui concerne la répartition de l'eau, on s'est surtout concentré sur les prélèvements plutôt que sur questions touchant les cours d'eau. Quant aux préoccupations pour les cours d'eau qui font l'objet d'une gestion parce qu'utilisés comme des voies navigables, elles concernaient surtout la navigation, les loisirs et la lutte contre la pol-

lution. Dans les cours d'eau naturels, le débit réservé (des critères de répartition) a souvent été défini en fonction d'un débit minimal probable (Pearce et al., 1985). Cette définition évolue maintenant pour englober les besoins de l'écosystème, comme l'illustre l'exemple ci-dessous de la rivière Saskatchewan Sud.

Les priorités de recherche et les changements dans les mesures institutionnelles ont souvent été liés à la modification de la ressource elle-même, notamment aux menaces immédiates d'approvisionnement insuffisant, aux conflits opposant les différents utilisateurs et aux risques pour la santé humaine (p. ex. contamination de l'approvisionnement en eau de la ville de Walkerton, en Ontario, en 2000). Parmi les nouveaux catalyseurs, on compte des facteurs externes, comme les changements climatiques, la mondialisation, la perception du besoin de durabilité, etc., et des facteurs internes, comme les changements dans l'aménagement du territoire, l'intensification de l'aménagement du territoire, la modification des structures gouvernementales et le vieillissement de l'infrastructure (fig. 2). Pour relever les défis posés par les divers catalyseurs, le processus qui est en train d'être mis en place fait appel, entre autres, à des changements au niveau institutionnel et l'adoption de nouvelles méthodes de consultation et d'évaluation.

Les répercussions possibles des changements climatiques sur les ressources en eau ont présenté des défis particuliers pour les professionnels de la gestion des eaux, en raison de leur caractère incertain et cumulatif et du très long horizon temporel probable. Les mesures en cours qui visent à définir les interventions institutionnelles appropriées aux impacts possibles des changements climatiques peuvent témoigner des défis que pose toute tentative d'inclure les effets intégrés de catalyseurs cumulatifs incertains dans une planification à long terme. En recherche, les études de sensibilité aux changements climatiques qui se fondaient sur les évaluations des impacts hydrologiques ont été élargies pour ajouter un accent accru sur une évaluation intégrée qui tient compte des facteurs institutionnels et socio-économiques (p. ex. Okanagan/Columbia–Cohen et al., 2000; Miles et al., 2000; Hamlet, 2003; Cohen et Neale, 2003). Le dialogue sur les problèmes cumulatifs comme les changements climatiques est également bien entamé dans les organismes professionnels et les groupements d'organismes, notamment l'Association canadienne des ressources hydriques, l'American Water Resources Association, la British Columbia Water Supply Association, la Fédération canadienne des municipalités, et dans les groupes régionaux de bassins hydrographiques (p. ex. le Conseil du bassin du Fraser). Aux États-Unis, quelques cas récents de planification dans la région du Nord-Ouest du Pacifique (p. ex., Palmer et Hahn, 2003) et en Californie (State Water Plan, Bulletin 160-03) ont commencé à intégrer des scénarios de changement climatique aux éléments plus classiques de la planification à long terme. L'expérience acquise lors de ces premières tentatives pourrait servir de guide pour des études semblables dans d'autres régions des États-Unis et du Canada.

Exemple de gestion élargie : le plan de gestion des eaux du bassin hydrographique de la rivière Saskatchewan Sud en Alberta

La rivière Saskatchewan Sud englobe une partie du bassin de la rivière Saskatchewan. Comme il a été mentionné précédemment, la répartition de l'eau dans les provinces des Prairies est établie par la Régie des eaux des provinces des Prairies. En Alberta, l'attribution de l'eau est la responsabilité du ministère albertain de l'Environnement et obéit au principe de l'appropriation antérieure. Les droits relatifs à l'eau étaient traditionnellement accordés aux utilisateurs, et une importance restreinte était donnée aux utilisations non consommatrices d'eau. Cette lacune a été progressivement comblée ces 25 dernières années par suite d'un sensibilisation accrue à l'égard du maintien des débits, d'une plus grande concurrence entre les utilisateurs de l'eau et des récentes périodes de faibles débits. Le gouvernement a alors instauré, entre autres mesures, l'échange des permis d'eau.

Par suite des demandes continues exercées sur les ressources en eau du bassin de la rivière Saskatchewan Sud, l'Alberta a élaboré un plan de gestion de ces ressources. La phase 1 du plan, qui s'est terminée en juin 2002 (Alberta Environment, 2002), portait sur les points suivants :

- autoriser un « directeur » désigné à envisager des demandes de transfert d'attribution de l'eau et le recours à des retenues d'eau;
- guider le directeur en ce qui concerne les éléments à prendre en considération lors de l'examen d'une demande de transfert d'attribution de l'eau;
- renseigner le directeur sur les retenues d'eau et fermer provisoirement les tributaires du sud de la rivière Oldman aux nouvelles attributions;
- engager Alberta Environment à l'égard d'un certain nombre de mesures, notamment une phase additionnelle de planification de la gestion de l'eau visant à établir des objectifs en matière de conservation de l'eau.

La deuxième phase du plan mettra l'accent sur la définition des exigences relatives aux besoins humains et des besoins du milieu aquatique. Le principal objectif de la deuxième phase consistera à faire un compromis entre ces intérêts opposés et des choix éclairés. Cette phase doit se terminer au début de 2004.

L'Alberta met également en œuvre une stratégie régionale qui vise à élaborer une vision pour l'avenir du sud de l'Alberta et définir les avantages environnementaux, sociaux et économiques qui sont souhaités pour la

région. Le gouvernement se penchera ensuite sur les problèmes et adoptera un plan permettant de réaliser cette vision. La première phase consistera à évaluer la situation actuelle de la région, à définir une vision, les buts et les principes de développement durable, à formuler des recommandations de politiques à adopter ainsi qu'à définir les questions clés et leur ordre de priorité. Au cours de la phase 1, qui doit être terminée avant l'été 2003, des données sur l'air, l'eau, l'aménagement du territoire et le milieu socio-économique seront recueillies et on procédera à la modélisation du paysage et à l'élaboration d'outils de simulation. Des renseignements seront également recueillis sur d'importants secteurs de ressources au cours de cette phase.

Leçons apprises

On peut résumer les récentes expériences en matière de méta-problèmes comme suit :

- les menaces cumulatives qui pèsent sur les bassins hydrographiques pourraient être dues à la fragmentation du processus décisionnel;
- il existe des exemples d'approches intégrées de gestion pour un certain nombre de bassins hydrographiques canadiens;
- la recherche et le dialogue se développent, mais il faut élargir l'éventail d'outils disponibles, notamment les outils utilisés en gestion axée sur la demande et étendre leur utilisation à l'ensemble du Canada.

Besoins en matière de connaissances et de programmes

La figure 2 montre un cadre général d'élaboration des orientations et des mesures de gestion en matière de menaces intégrées et cumulatives. Ce processus englobe une grande diversité d'analyses techniques, économiques et sociales. Pour évaluer l'efficacité des mesures de gestion, on peut se baser sur l'état de l'écosystème, la santé humaine, les mesures économiques, la durabilité à long terme et la satisfaction des attentes des groupes intéressés.

Le présent chapitre porte sur les divers aspects de la gestion des menaces intégrées et cumulatives. Une question très importante est de savoir si ce cadre peut faire face à des défis futurs (p. ex. croissance de la population, impacts de la mondialisation sur le développement régional, changements climatiques, etc.) que la planification au niveau des réseaux hydrographiques et des institutions pourrait être incapable de traiter adéquatement. Les problèmes de gestion résultent des demandes que nous exerçons sur les ressources en eau. Par conséquent, les gouvernements ont élaboré des mesures institutionnelles qui visent à favoriser le développement économique en garantissant la sécurité de l'approvisionnement en eau ou à répartir l'eau entre les utilisateurs (municipalités, industries et régions rurales, navigation, production d'hydroélectricité et augmentation du débit d'étiage). Mais, lorsque les conditions d'exploitation se modifient (p. ex. en raison de la construction de nouvelles installations ou des changements climatiques) et que les consignes d'exploitation des réservoirs ou les mécanismes de répartition ne remplissent plus leur fonction initiale, un long processus décisionnel devient nécessaire pour amorcer des changements. L'ordonnance de la CMI relative aux niveaux du lac Kootenay à l'intérieur du réseau du Columbia (Bankes, 1996) et les plans de régulation des lacs Supérieur et Ontario (Sousounis et Bisanz, 2000; Mortsch et al., 2000) en sont des exemples.

De nouvelles questions?

Le présent chapitre suscite certaines questions, dont les suivantes.

- Dans quelle mesure les ressources en eau souterraine et en eau de surface du Canada sont-elles durables compte tenu des 250 dernières années de variabilité climatique et des changements climatiques possibles qui sont prévus au cours des 100 prochaines années? Comment peut-on mesurer la durabilité? Les incertitudes sont-elles si grandes qu'il est impossible de répondre à cette question d'une façon probante? Si tel est le cas, que doit-on faire?
- Comment (et en fonction de quels critères – p. ex. économiques ou sociaux) peut-on répartir au mieux l'eau entre les utilisateurs et les usages concurrentiels?
- Comment devrait-on établir et gérer les exigences relatives aux débits réservés (compromis entre les aspects écologiques et les besoins humains)?
- Comment mettre en place des entités responsables de la gestion de l'eau qui sont plus souples et peuvent réagir aux nouvelles conditions sans intervenir de manière récursive lorsque des problèmes imprévus surviennent?
- Comment faire en sorte que la gestion de l'eau tienne compte des questions de gouvernance pour que la capacité d'intervention des institutions ne soit pas fragmentée lorsque les conditions changent?
- Quel peut être le rôle des progrès technologiques dans un contexte de demande accrue et d'approvisionnement limité? Où les différentes technologies pourront-elles être utilisées au mieux et à quel prix?
- Quels liens formels doit-on établir entre la planification des ressources en eau et l'aménagement du territoire pour assurer la durabilité?

Recommandations

En conclusion, pour ce qui est des menaces intégrées et cumulatives pour la disponibilité de l'eau au Canada, nous recommandons principalement que les intervenants gouvernementaux et non gouvernementaux prennent les mesures suivantes :

1. *Évaluer les menaces intégrées et cumulatives et établir les liens appropriés avec la planification et la gestion de l'eau*

Au niveau le plus général, il faut mieux définir et évaluer les menaces intégrées et cumulatives résultant de toutes les menaces décrites dans les autres chapitres du présent document et utiliser cette information pour bien planifier et gérer les ressources en eau dans le cadre des responsabilités découlant de la gouvernance à l'échelle des bassins hydrographiques ainsi qu'à l'échelle provinciale, nationale et internationale.

2. *Faire du dialogue un outil formel de gestion*

Les gestionnaires et les planificateurs de ressources en eau collaborent souvent avec les groupes intéressés pour une diversité de motifs. Compte tenu de la complexité grandissante des méta-problèmes qui touchent l'eau, un dialogue régulier avec les groupes intéressés fournit l'occasion d'enrichir les connaissances au-delà des caractéristiques physiques d'un réseau hydrographique. On peut ainsi mieux encadrer les problèmes. Le défi consiste à élaborer des méthodes qui permettent d'évaluer et peut-être d'améliorer la capacité des organismes gouvernementaux et non gouvernementaux de gérer efficacement les menaces cumulatives, ce qui englobe les tâches suivantes : (i) définir diverses formes de partenariat ainsi que leurs forces et leurs faiblesses relatives; (ii) évaluer la capacité des organismes gouvernementaux et non gouvernements de former des partenariats; (iii) déterminer les facteurs qui favorisent des partenariats efficaces; (iv) s'assurer du respect de niveaux appropriés d'imputabilité, d'efficacité, d'efficience et d'équité pour ce qui est de la gestion de la quantité d'eau.

En ce qui concerne les programmes, il faut bien préciser le rôle des pouvoirs publics dans le renforcement des capacités auprès des partenaires non gouvernementaux pertinents ainsi que dispenser une formation sur les processus de groupe et les stratégies de résolution de conflits afin d'améliorer l'efficacité des mesures institutionnelles et les interactions avec les groupes intéressés.

3. *Utiliser une plus grande diversité d'outils d'intervention*

Une bonne gestion de l'eau repose sur l'existence de différentes options pour résoudre les problèmes; or, les programmes font souvent appel à une approche unique, comme l'illustre la construction des réservoirs sur le fleuve Columbia. On peut recourir à divers outils bien connus pour appuyer la gestion de la demande, notamment des campagnes d'information, l'octroi de subventions à l'utilisation d'une nouvelle technologie (p. ex. l'irrigation goutte à goutte), la régulation, et la tarification des services publics et privés.

En pratique, pour ce qui est des besoins en matière de programmes, il faut s'assurer que le financement des projets ne favorise pas une approche au détriment d'autres solutions valables et que les impacts directs et indirects de leur mise en œuvre ont été bien soupesés. Sinon, il faudra continuellement « résoudre » des problèmes imprévus, comme dans le bassin du Columbia.

4. *S'assurer que le processus décisionnel tient compte de l'équité et de la durabilité*

Les mesures classiques de l'efficacité et de l'efficience des objectifs des programmes et l'évaluation des programmes ont souvent un horizon temporel relativement court. La notion de développement durable nous oblige à élargir ces critères pour qu'ils englobent des mesures qui visent les besoins des générations futures. En l'absence d'autres progrès technologiques qui pourraient réduire la demande en eau ou fournir d'autres sources d'approvisionnement, les demandes accrues auxquelles sont soumises les réserves d'eau témoignent également de la nécessité d'accorder plus d'attention au traitement équitable des utilisateurs, tant au cours du processus décisionnel que dans les décisions qui sont prises en matière de répartition de l'eau. Cet aspect est mis en lumière par les collectivités autochtones du Canada qui peuvent avoir recours au système juridique pour faire valoir leurs droits à des réserves d'eau suffisantes. Par exemple, Rush (2002) a décrit une revendication faite par la nation des Piikanis en vertu du Traité no 7 concernant l'eau de la rivière Oldman qui traverse la réserve dans le sud de l'Alberta. Même si aucune cour canadienne n'a statué sur une revendication de droits relatifs à l'eau, Rush (2002) a maintenu que la jurisprudence à l'égard des droits fonciers pourrait appuyer l'existence de droits relatifs à l'eau des Autochtones. En 2002, le règlement négocié entre le gouvernement albertain et les Piikanis englobait les éléments suivants :

- versement de 64,3 millions de dollars dans un fonds en fiducie;
- versement annuel de 800 000 dollars (indexé à l'inflation);
- revenus estimatifs de 125 millions de dollars produits par le fonds en fiducie au cours des 50 prochaines années;
- attribution de 3 000 dollars par habitant aux membres de la nation Piikani;
- transfert des terres contiguës au canal du Lethbridge Northern Irrigation District (LNID) au gouvernement albertain;
- approvisionnement en eau de la rivière Oldman suffisant pour répondre aux besoins résidentiels, collectifs et agricoles, et attribution de 37 000 acres-pieds d'eau conformément aux dispositions de la loi sur les ressources en eau de l'Alberta de façon à satisfaire aux besoins commerciaux de la bande;
- participation au projet de barrage hydroélectrique de la rivière Oldman;

- règlement de neuf revendications particulières auprès du gouvernement canadien (pour un montant de 32,17 millions de dollars);
- abandon des poursuites des Piikanis en ce qui concerne leurs droits relatifs à l'eau;
- abandon des revendications concernant les ouvrages de dérivation du LNID;
- acceptation par les Piikanis de n'intenter aucune autre poursuite aussi longtemps que l'Alberta aura besoin des ouvrages de dérivation du LNID pour détourner l'eau de la rivière Oldman;
- absence de droits acquis ou supérieurs relatif à l'eau.

Les collectivités autochtones pourraient engager des poursuites similaires dans l'avenir afin de demander aux tribunaux de confirmer leurs droits relatifs à l'eau.

5. Améliorer la capacité d'intervention des institutions

Le renforcement des capacités consiste à mieux outiller les gens et les institutions pour qu'ils puissent faire ce qu'on attend et exige d'eux. Au cours des 10 ou 15 dernières années, les rôles, les attentes et les exigences des participants gouvernementaux et non gouvernementaux et du public à l'égard de la gestion de l'eau ont évolué. Les capacités s'appuient sur plusieurs facteurs sectoriels, notamment l'accès aux ressources techniques (données, compétences, personnel), la disponibilité des ressources financières, la qualité des mesures institutionnelles, l'importance de la participation des citoyens au processus décisionnel et le leadership (de Loë et al., 2002). Ces diverses dimensions sont étroitement liées. À mesure que les responsabilités se déplacent entre les diverses parties intéressées dans la gestion de l'eau et que de nouveaux défis se présentent, les capacités des organisations et des collectivités devraient retenir l'attention. Le renforcement des capacités est donc en train de devenir un élément important de la gestion de l'eau.

Pour compléter les travaux qui portent sur le cycle hydrologique ou sur l'amélioration de la planification et de la gestion de l'approvisionnement et de la demande, les recherches futures devraient tenir compte des forces qui agissent sur les ressources ainsi que des capacités de gestion au niveau régional. Par ailleurs, étant donné que de nombreux bassins hydrographiques franchissent des frontières provinciales ou nationales, le gouvernement canadien, en collaboration avec ses partenaires régionaux et la Commission mixte internationale, devrait examiner systématiquement divers modèles de gestion intergouvernementale de l'eau.

6. Investir davantage dans les banques de données et améliorer l'accès aux données

Le Canada, en collaboration avec ses partenaires régionaux, a investi dans un système de surveillance à long terme de la quantité d'eau. On peut également trouver un peu d'information pour des périodes de temps plus courtes sur les besoins en eau et des paramètres chimiques de l'eau. Il y a toutefois peu d'information sur des paramètres biologiques reliés aux milieux aquatiques et riverains.

Étant donné que les principaux utilisateurs de l'information sur l'eau ne recueillent peut-être pas les données, l'accès à l'information obtenue grâce aux fonds publics est un problème important. Mais, la création et le maintien de banques de données détaillées ne sont pas des tâches faciles. Les investissements dans l'infrastructure des banques de données devront être faits par une diversité de groupes intéressés. Le milieu de la gestion de l'eau pris dans sa totalité (groupes intéressés, gestionnaires, administrateurs, décideurs) doit s'interroger sur la meilleure façon de créer de tels partenariats. L'évaluation des menaces intégrées et cumulatives qui pèsent sur la disponibilité de l'eau peut exiger de nombreux types différents de données provenant d'une grande diversité de sources.

7. Étendre la recherche

Un examen des recherches sur les ressources hydriques a été effectué dans le cadre de l'Enquête de 1985 sur la politique fédérale relative aux eaux (Pearce et al., 1985). Cet examen a permis de faire les constatations suivantes, entre autres :

- le Canada a la réputation de n'accorder qu'un léger soutien à la plupart des types de recherche sur l'eau;
- le financement fédéral a été accordé en majeure partie pour la recherche sur la qualité de l'eau, et la plupart des travaux concernaient l'Ontario et le Québec;
- l'eau souterraine et l'efficacité de l'utilisation de l'eau sont deux sujets qui exigent d'autres études;
- la plupart des recherches étaient centrées sur le génie et les sciences naturelles plutôt que sur les sciences sociales.

Les progrès réalisés depuis en recherche ont été mitigés. Ainsi, le Programme des chaires de recherches du Canada du CRSNG et les Réseaux de centres d'excellence ont contribué au développement de la recherche sur l'eau dans le milieu universitaire. Mais, la mesure dans laquelle ces initiatives et d'autres ont permis de se pencher sur les questions liées au volume d'eau, surtout du point de vue des sciences sociales, est moins évidente. La capacité des gouvernements d'entreprendre des recherches a diminué par suite des compressions effectuées au cours des années 1990. L'état de la recherche sur les ressources en eau au Canada devrait être réexaminé afin de voir si des progrès ont été accomplis depuis l'Enquête de 1985 et de définir les possibilités futures.

Nous n'avons pas tenté de classer ces recommandations par ordre d'importance. Nous espérons qu'elles seront prises en considération et qu'un consensus sera possible en vue de leur mise en oeuvre dans l'ensemble des bassins hydrographiques du Canada.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'évaluateur externe Peter Gleick et les évaluateurs internes pour leur évaluation constructive du présent chapitre.

Références

Alberta Environment. 2002. « South Saskatchewan River basin water management plan, phase one: water allocation transfers ». Department of Environment, Government of Alberta, Calgary (Alberta), juin 2002.

Bankes, N. 1996. « The Columbia basin and the Columbia River Treaty: Canadian perspectives in the 1990s. Faculty of Law, University of Calgary, submitted to Northwest Water Law and Policy Project ».

Changnon, S. et M. Glantz. 1996. « The Great Lakes diversion at Chicago and its implications for climate change ». Climatic Change 32: 199-214.

Cohen, S.J., K.A. Miller, A.F. Hamlet et W. Avis. 2000. « Climate change and resource management in the Columbia River Basin ». Water International 25(2): 253-272.

Cohen, S. et T. Neale (s. la dir. de). 2003. « Expanding the dialogue on climate change and water management in the Okanagan Basin, British Columbia. Interim Report, Project A463/433 », soumis au Fonds d'action pour le changement climatique, Ressources naturelles Canada, Ottawa. 150 p.

Commission mixte internationale (CMI). 2000. Rapport final sur la protection des eaux des Grands Lacs présenté aux gouvernements du Canada et des États-Unis d'Amérique, février.

Conseil des gouverneurs des Grands Lacs. 1985. La Charte des Grands Lacs. Principes de gestion des ressources en eau des Grands Lacs. Disponible de : http://www.cglg.org/pub/charter/index.html. Site visité le 10 octobre 2003.

Conseil des gouverneurs des Grands Lacs. 2001. Annexe à la Charte des Grands Lacs. Entente additionnelle à la charte des Grands Lacs, 18 juin 2001, 4 p.

de Loë, R.C., S. Di Giantomasso et R.D. Kreutzwiser. 2002. « Local capacity for groundwater protection in Ontario ». Environ. Manage. 29(2): 217-233.

Grand River Conservation Authority. 1998. « State of the Grand River Watershed: focus on watershed issues, 1996-1997 ». GRCA, Cambridge (Ontario).

Hamlet, A.F. 2003. « The role of transboundary agreements in the Columbia River basin: an integrated assessment in the context of historic development, climate, and evolving water policy ». *Dans* Diaz, H. et B. Morehouse (s. la dir. de), « Transboundary challenges in the Americas ». Kluwer Press, Dordrecht.

Miles, E.L., A.K. Snover, A. Hamlet, B. Callahan et D. Fluharty. 2000. « Pacific Northwest regional assessment: the impacts of climate variability and climate change on the water resources of the Columbia River basin ». J. Amer. Water Resour. Assoc. 36(2): 399-420.

Miller, K.A. 2000. « Managing supply variability: the use of water banks in the Western U.S. », p. 70-86. *Dans* Wilhite, D.A. (s. la dir. de), « Drought: a global assessment, Vol. II ». Routledge, Londres.

Mitchell, B. 2002. « Resource and environmental management, 2nd edition ». Prentice Hall, Londres.

Mortsch, L., H. Hengeveld, M. Lister, B. Lofgren, F. Quinn, M. Slivitzky et L. Wenger. 2000. « Climate change impacts on the hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence system ». Can. Water Resour. J. 25(2): 153-179.

National Marine Fisheries Service. 1995. « Biological opinion: reinitiation of consultation on 1994-1998 operation of the Federal Columbia River power system and juvenile transportation program in 1995 and future years, Section 7 Endangered Species Act Consultation ».

National Marine Fisheries Service. 2000. « Biological opinion: reinitiation of consultation on operation of the federal Columbia River Power System, including the juvenile fish transportation program, and 19 Bureau of Reclamation Projects in the Columbia Basin, Section 7 Endangered Species Act Consultation », décembre.

Neufeld, D.A. 2000. « An ecosystem approach to planning for groundwater: the case of Waterloo Region, Ontario, Canada ». Hydrogeol. J. 8: 239-250.

O'Neil, P. 1997. « B.C. compensation for power rejected ». Vancouver Sun, octobre 23.

Palmer, R.N. et M. Hahn. 2003. « The impacts of climate change on Portland's water supply: an investigation of potential hydrologic and management impacts on the Bull Run system. Report prepared for the Portland Water Bureau, University of Washington », Seattle. 67 p.

Pearce, P., F. Bertrand et J.W. MacLaren. 1985. Vers un renouveau : rapport définitif de l'Enquête sur la politique fédérale relative aux eaux. Environnement Canada, Ottawa.

Rush, S. 2002. « Aboriginal water rights in Canada. Presented to the Just Add Water 2002 Conference, Saskatoon, Saskatchewan » octobre 3-4, 2002.

Saunders, J.O. 2000. « Law and the management of the Great Lakes ». Can. Water Resour. J. 25(2): 209-242.

Sousinis, P.J. et J.M. Bisanz (s. la dir. de). 2000. « Preparing for a changing climate: the potential consequences of climate variability and change-Great Lakes overview. A report of the Great Lakes Regional Assessment Group for the U.S. Global Change Research Program ».

Volkman, J.M. 1997. « A river in common: the Columbia River, the salmon ecosystem and water policy. Report to the Western Water Policy Review Advisory Commission ».

Autres sources

DeVillers, M. 2000. « Water ». Houghton Mifflin Company, Boston.

Ellis, J. 1996. « Drafting from an overdrawn account: continuing water diversions from the mainstem Columbia and Snake Rivers ». Environ. Law 26: 299-322.

Foster, H.D. et W.R.D. Sewell. 1981. « Water: the emerging crisis in Canada ». James Lorimer & Company, Toronto.

Gleick, P. 1998. « The world's water. The biennial report on freshwater resources 1998-1999 ». Island Press, Washington.

Gleick, P. 2000. « The world's water. The biennial report on freshwater resources 2000-2001 ». Island Press, Washington.

Gleick, P. avec W.C.G. Burns, E.L. Chalecki, M. Cohen, K.K. Cushing, A.S. Mann, R. Reyes, G.H. Wolff et A.K. Wong. 2002. « The world's water. The biennial report on freshwater resources 2002-2003 ». Island Press, Washington.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. « Climate change 2001: impacts adaptation and vulnerability ». Cambridge University Press, Cambridge. Disponible de : http://www.ipcc.ch. Site visité le 10 octobre 2003.

Mitchell, B. 1990. « Integrated water management: international experiences and perspectives ». Belhaven, New York.

Mitchell, B. et J.S. Gardiner (s. la dir. de). 1983. « River basin management; Canadian experiences ». University of Waterloo, Department of Geography Publication Series No. 35.

Mitchell, B. et D. Shrubsole. 1994. « Canadian water management: visions for sustainability ». Canadian Water Resources Association, Cambridge (Ontario).

Mitchell, B. et D. Shrubsole. 1992. « Ontario conservation authorities: myth and reality ». University of Waterloo, Department of Geography Publication Series No. 35.

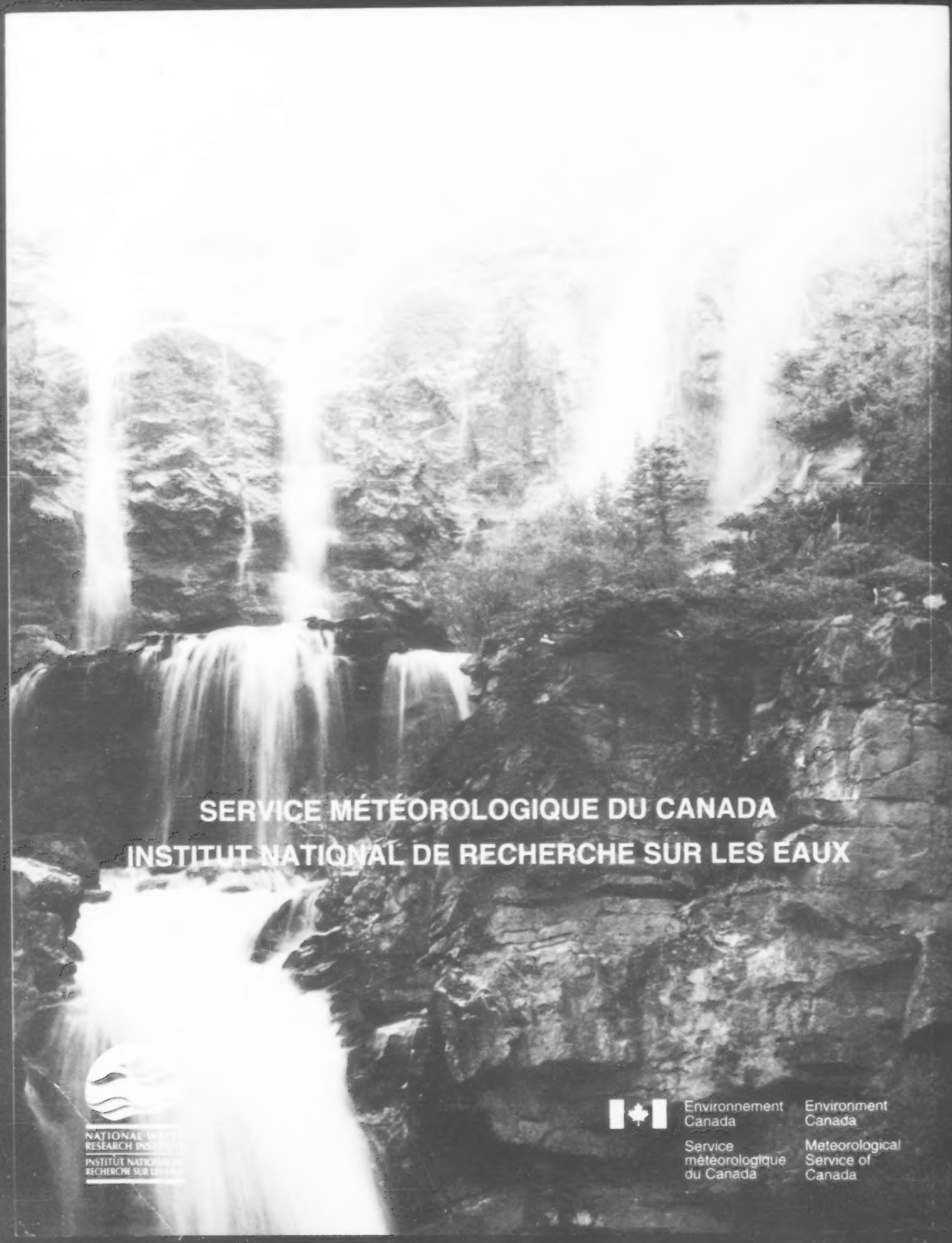
Shrubsole, D. 1992. « Integrated water management strategies in Canada », p. 88-118. *Dans* Mitchell, B. (s. la dir. de), « Integrated water management: international experiences and perspectives ». Belhaven, New York.

Shrubsole, D. et B. Mitchell (s. la dir. de). 1997. « Practising sustainable water management: Canadian and international experiences ». Canadian Water Resources Association, Cambridge (Ontario).

---

[1] Même si le barrage Dworshak a été terminé avant le barrage Libby, sa construction n'était pas directement liée au TFC.

[2] Plusieurs barrages non liés au TFC ont été construits plus tard. BC Hydro a construit le barrage Revelstoke en tant que centrale au fil de l'eau en aval du barrage Mica en 1984 (Bankes, 1996). Sur l'Okanagan, les États-Unis ont construit le barrage Zosel en 1987, juste au sud du lac Osoyoos.



SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE DU CANADA
INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SUR LES EAUX

NATIONAL WATER RESEARCH INSTITUTE
INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SUR LES EAUX

Environnement Canada
Service météorologique du Canada

Environment Canada
Meteorological Service of Canada